

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

GRADO EN INGENIERÍA EN VEHÍCULOS AEROESPACIALES

PROYECTO FINAL DE GRADO

Proyecto de mejora de la durabilidad
de los pavimentos usados en
aeropuertos empleando materiales
alternativos y geo-sintéticos

MEMORIA

Autor:

Juan José Cabezuelo Moreno

Director:

Marcelo De Sousa Pais Antunes

Tutor:

Daniel García Almiñana

TERRASSA, MAYO 2015



**Escola Tècnica Superior d'Enginyeries
Industrial i Aeronàutica de Terrassa**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Resumen

El mundo de la aviación y en concreto el del diseño de aviones avanza hacia aeronaves que puedan transportar un mayor número de pasajeros, es por ello que es necesario el estudio del pavimento de los aeropuertos concretamente en este caso el pavimento de tipo flexible. Primeramente se lleva a cabo un estudio de los pavimentos y los diferentes problemas que presentan junto con un estado del arte de la situación actual y su evolución, que sirve para establecer el contexto sobre el que se trabajará más adelante.

Posteriormente se presentan una gran variedad de materiales geo-sintéticos de los que finalmente se escoge una solución novedosa como es la introducción de geomembranas de polipropileno caracterizadas por su proceso de obtención basado en la extrusión y estirado frío-caliente, estableciéndose de esta manera el estudio de este material como el núcleo del proyecto.

Por último y de cara a mostrar su posible introducción al mercado se realiza una caracterización mecánica, de impermeabilidad al agua y térmica por lo que resulta ser, teniendo en cuenta algunas pequeñas consideraciones, un candidato prometedor para formar parte de futuros pavimentos flexibles de aeropuertos.

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer el apoyo que he recibido por parte de mi director del proyecto Marcelo De Sousa que siempre se ha mostrado abierto a resolver las dudas que me han ido apareciendo a lo largo del desarrollo del proyecto con una muy buena predisposición y mostrando el material de una manera muy motivante. También dar las gracias al Centre Català del Plàstic por permitirme realizar la parte experimental y al profesor David Arencón y a Pilar Castejón por las membranas de polipropileno.

Por supuesto a los grandes amigos de la universidad que siempre me han apoyado durante estos cuatro años de grado. Especialmente a Pedro, sabes que eres como un hermano, Alejandro, Jose y Arnau, que este cuatrimestre quizás no nos hemos juntado tanto pero seguís siendo muy importantes para mí, Rubén, que al fin hemos podido compartir tiempo juntos y he descubierto una gran persona, las chicas que están fuera, Mònica y Aura, que nos hemos reído muchísimo y me habéis enseñado cosas muy importantes... los grandes momentos compartidos me los llevo dentro, sin todos vosotros esto no hubiera sido igual.

También a mis amigos de toda la vida, en especial a Kevin y Planisi, que siempre están ahí y que son parte de mi familia porque sé que jamás me fallarían.

A las personas que he conocido estos últimos meses, especialmente a ti que me has cambiado la forma de pensar y de plantearme la vida, gracias por aparecer.

Por último, a mi familia que me apoya cada día desde las islas y que siempre ha respetado mis decisiones, dándome buenos consejos y poniéndome un poco las pilas cuando me hacía falta, me hacéis tremendamente feliz.

Contenido

Resumen	I
Agradecimientos	II
Lista de figuras	V
Lista de tablas	VIII
1. Introducción.....	1
1.1 Objetivo	1
1.2 Requisitos	1
1.3 Alcance y justificación de la utilidad del proyecto.....	1
2. Investigación bibliográfica y estado del arte sobre pavimentos de aeropuertos.....	3
2.1 Historia, evolución y estado actual.....	3
2.2 Descripción de los tipos de pavimentos.....	7
2.2.1 Descripción de las diferentes capas del pavimento flexible de los aeropuertos	7
2.2.2 Descripción de las diferentes capas del pavimento rígido de los aeropuertos	9
3. Planteamiento de los problemas en pavimentos flexibles y posibles soluciones al mismo.....	11
3.1 Formación de grietas.....	11
3.2 Desintegración	13
3.3 Distorsión	14
3.4 Pérdida de adherencia.....	15
3.5 Drenaje	16
4. Selección de los materiales y combinaciones de cara a su uso en pavimentos flexibles de aeropuertos	17
4.1 Materiales geo-sintéticos	17
4.2 Selección final del material.....	25
5. Caracterización del material seleccionado.....	26
5.1 Proceso de obtención de los films	27
5.2 Caracterización del comportamiento mecánico	32
5.2.1 Preparación de las probetas.....	32
5.2.2 Procedimiento de los ensayos.....	34
5.2.3 Presentación de resultados	36

5.3 Caracterización de la impermeabilidad al paso del agua	51
5.4 Caracterización de las propiedades térmicas	52
5.4.1 Procedimiento del ensayo	52
5.4.2 Presentación de resultados	53
6. Resumen económico.....	56
7. Estudio del impacto medioambiental	57
8. Consideraciones de seguridad	58
9. Planificación del proyecto	60
9.1 Planificación de las tareas.....	60
9.2 Dedicación a las tareas.....	65
9.3 Planificación de futuras tareas.....	65
10. Conclusiones y recomendaciones	67
11. Bibliografía y normativa	69

Lista de figuras

Figura 1. Evolución temporal del máximo peso en despegue para distintos aviones comerciales (J.M. Baring 1997)	4
Figura 2. (a) Aplicación teórica de un geo-grid en la base de un	5
Figura 3. Fotografías de un (a) geo-textil no tejido (NAUE 2006) y de un (b) geo-textil tejido (NAUE 2006)	5
Figura 4. Estructura 3D en forma de panel de abeja Geo-cell (NAUE 2006)	6
Figura 5. (a) Método de transmisión de la carga en pavimentos flexibles y (b) distribución de las diferentes capas en pavimentos flexibles (Federal Aviation Administration 2007)	7
Figura 6. (a) Método de transmisión de la carga en pavimentos rígidos y (b) distribución de las diferentes capas en pavimentos rígidos (Federal Aviation Administration 2007)	9
Figura 7. Agrietamiento Alligator (Moghaddam et al. 2011)	12
Figura 8. Análisis del refuerzo de fibra de vidrio (geo-grid) en referencia a la deformación del pavimento (Buonsanti & Leonardi 2012)	18
Figura 9. (a) Intrusión de partículas finas en el conglomerado de mayor tamaño e (b) intrusión de partículas del conglomerado en las partículas finas (Koerner 2005)	19
Figura 10. Incorporación de geo-textil para la mejora del comportamiento a tracción de arena sometida a 21 kPa de presión, en función de su disposición (Koerner 2005)	20
Figura 11. Sistema de filtración utilizando las partículas más gruesas para evitar el paso de partículas pequeñas a través del tejido de geo-textil (Koerner 2005)	20
Figura 12. Estructura sándwich compuesta por dos láminas de geo-membrana que envuelven al geo-grid (Koerner 2005)	22
Figura 13. Instalación de poliestireno expandido en el aeropuerto de Nueva Orleans (Armstrong 1995)	23
Figura 14. Estructura 3D geo-cell formada por la unión de tiras (Koerner 2005)	24
Figura 15. Compuesto formado por HDPE en forma de geo-cell, arena y asfalto (Koerner 2005)	24
Figura 16. Micrografías realizadas con micrografía electrónica de barrido (SEM) de algunas de las muestras de geo-membranas de polipropileno a 10000 aumentos	26
Figura 17. Extrusora monohusillo EUROTECNO utilizada en la preparación de los precursores sólidos de las membranas.	28
Figura 18. Cilindro monohusillo sinfín utilizada en la preparación de los precursores sólidos de las membranas.	29
Figura 19. A la izquierda el cabezal plano Verbruggen modelo MO-400/LAB (3 zonas de control de temperatura) y a la derecha el sistema de enfriamiento a la salida del cabezal	30
Figura 20. Rodillos de calandrado	31
Figura 21. Probeta tipo 5 para ensayo a tracción, extraída de la norma ISO 527-3	32
Figura 22. Cuchilla de la troqueladora para obtener la geometría de la probeta tipo 5	33
Figura 23. Probeta tipo para determinación de la resistencia al rasgado, extraída de la norma ISO 6383-1	33

Figura 24. Colocación de la probeta en el ensayo a tracción llevado a cabo en la máquina de ensayos universales Galdabini Sun 2500	34
Figura 25. Colocación de la probeta en la determinación de la resistencia al rasgado, extraído de la norma ISO 6383-1	35
Figura 26. Gráfica esfuerzo frente a deformación de la probeta MD1 extraída del ensayo de tracción	38
Figura 27. Gráfica de la zona lineal de la curva esfuerzo frente a deformación de la probeta MD1 para el cálculo del módulo de Young	38
Figura 28. Gráfica esfuerzo frente a deformación de la probeta MD2 extraída del ensayo de tracción	39
Figura 29. Gráfica de la zona lineal de la curva esfuerzo frente a deformación de la probeta MD2 para el cálculo del módulo de Young	39
Figura 30. Gráfica esfuerzo frente a deformación de la probeta MD3 extraída del ensayo de tracción	40
Figura 31. Gráfica de la zona lineal de la curva esfuerzo frente a deformación de la probeta MD3 para el cálculo del módulo de Young	40
Figura 32. Gráfica esfuerzo frente a deformación de la probeta MD4 extraída del ensayo de tracción	41
Figura 33. Gráfica de la zona lineal de la curva esfuerzo frente a deformación de la probeta MD4 para el cálculo del módulo de Young	41
Figura 34. Gráfica esfuerzo frente a deformación de las probetas MD extraídas del ensayo de tracción	42
Figura 35. Gráfica esfuerzo frente a deformación de la probeta TD1 extraída del ensayo de tracción	44
Figura 36. Gráfica de la zona lineal de la curva esfuerzo frente a deformación de la probeta TD1 para el cálculo del módulo de Young	44
Figura 37. Gráfica esfuerzo frente a deformación de la probeta TD2 correspondiente a un ensayo no válido, extraída del ensayo de tracción	45
Figura 38. Gráfica esfuerzo frente a deformación de la probeta TD3 extraída del ensayo de tracción	45
Figura 39. Gráfica de la zona lineal de la curva esfuerzo frente a deformación de la probeta TD3 para el cálculo del módulo de Young	46
Figura 40. Gráfica esfuerzo frente a deformación de la probeta TD4 extraída del ensayo de tracción	46
Figura 41. Gráfica de la zona lineal de la curva esfuerzo frente a deformación de la probeta TD4 para el cálculo del módulo de Young	47
Figura 42. Gráfica esfuerzo frente a deformación de las probetas TD extraídas del ensayo de tracción	48
Figura 43. Comparación entre probetas MD y TD. Descritas de arriba abajo: Probeta sin ensayar, probeta MD ensayada y probeta TD ensayada	49
Figura 44. Comparación entre probetas MD y TD. Descritas de arriba abajo: Probeta sin ensayar, probeta MD ensayada y probeta TD ensayada	50
Figura 45. Análisis termogravimétrico. De arriba abajo: (1) Curva de porcentaje de peso frente a temperatura. (2) Flujo de calor frente a temperatura. (3) Primera derivada del porcentaje de pérdida de peso frente a temperatura	53
Figura 46. Análisis termogravimétrico destacando algunos puntos de interés. De arriba abajo: (1) Curva de porcentaje de peso frente a temperatura. (2) Flujo de calor frente a temperatura	54

<i>Figura 47. Listado de tareas extraído del software Gantt Project conforme a la planificación definitiva del proyecto</i>	62
<i>Figura 48. Diagrama de Gantt inicial, incluido en el Project Charter</i>	63
<i>Figura 49. Diagrama de Gantt definitivo del proyecto</i>	64

Lista de tablas

Tabla 1. Principales características de funcionamiento de la extrusora EUROTECNO utilizada en la preparación de los precursores sólidos de las membranas	27
Tabla 2. Principales parámetros de trabajo de la extrusora EUROTECNO utilizada en la preparación de los precursores sólidos de las membranas	28
Tabla 3. Principales características del cabezal plano empleado en la extrusora monohusillo	30
Tabla 4. Grado de estiramiento en función de la temperatura de trabajo	31
Tabla 5. Principales parámetros fijados en el ensayo a tracción	35
Tabla 6. Principales parámetros fijados en el ensayo para determinar la resistencia al rasgado	36
Tabla 7. Cálculo del área de las probetas sometidas a tracción	36
Tabla 8. Parámetros extraídos del ensayo de tracción de la probeta MD1	39
Tabla 9. Parámetros extraídos del ensayo de tracción de la probeta MD2	40
Tabla 10. Parámetros extraídos del ensayo de tracción de la probeta MD3	41
Tabla 11. Parámetros extraídos del ensayo de tracción de la probeta MD4	42
Tabla 12. Parámetros extraídos del ensayo de tracción de la probeta MD5	42
Tabla 13. Parámetros promediados extraídos del ensayo de tracción de las probetas MD	43
Tabla 14. Parámetros extraídos del ensayo de tracción de la probeta TD1	44
Tabla 15. Parámetros extraídos del ensayo de tracción de la probeta TD3	46
Tabla 16. Parámetros extraídos del ensayo de tracción de la probeta TD4	47
Tabla 17. Parámetros extraídos del ensayo de tracción de las probetas TD5, TD6 Y TD7	47
Tabla 18. Parámetros promediados extraídos del ensayo de tracción de las probetas TD	48
Tabla 19. Características principales del equipo para el análisis termogravimétrico	52
Tabla 20. Características del ensayo de la pérdida de masa en función de la temperatura	52
Tabla 21. Tabla resumen del presupuesto	56
Tabla 22. Tabla resumen del presupuesto	57
Tabla 23. Resumen del tiempo dedicado a las tareas	65
Tabla 24. Resumen del tiempo dedicado a las tareas futuras	66

1. Introducción

1.1 Objetivo

El objetivo de este proyecto es contribuir a la mejora de la durabilidad de los pavimentos usados en las pistas de aeropuertos, en concreto pavimentos de tipo flexible, empleando combinaciones de capas de diferentes materiales y geo-sintéticos. En particular, plantear el uso de materiales novedosos como alternativa a las típicas capas de pavimento a base de hormigón y mejora de la durabilidad de las mismas empleando combinaciones de sendos materiales y geo-sintéticos.

1.2 Requisitos

- En base a una selección previa de los materiales y combinaciones consideradas más idóneas de cara a su uso en pavimentos flexibles de aeropuertos, en particular de materiales geo-sintéticos y de materiales alternativos a las típicas capas de pavimento a base de hormigón de cara a la mejora de la durabilidad de dichos pavimentos según norma, se pretende caracterizar experimentalmente sendos materiales en las instalaciones del Centre Català del Plàstic.
- En particular, se procederá a la caracterización mecánica a tracción de sendos materiales, usando para ello una máquina de ensayos universales Galdabini SUN 2500 siguiendo la norma ISO 527 para materiales plásticos.
- Por otra parte, se procederá a la caracterización de la impermeabilidad al paso del agua según la norma ASTM E 96-95.
- Asimismo, se contempla una caracterización suplementaria de los materiales, en particular en términos de su estabilidad térmica por análisis termogravimétrico usando un analizador termogravimétrico TGA/DSC 1 Mettler Toledo Star System, o de su durabilidad al aplicar un proceso de degradación acelerada y análisis del comportamiento mecánico y de impermeabilidad al paso del agua siguiendo las normas mencionadas previamente.

1.3 Alcance y justificación de la utilidad del proyecto

La evolución en el mundo de la aviación tiende a aviones más pesados, por la necesidad de transportar mayor número de pasajeros y a su vez los aeropuertos se ven sometidos a un mayor flujo aéreo y por tanto un mayor número de aterrizajes, información que aparece ampliada en el apartado de investigación bibliográfica y estado del arte.

Es por esto, que es necesaria una innovación en los materiales que se adapte a estas nuevas características. En este proyecto se estudia la implantación de materiales geo-sintéticos y la combinación de los mismos para poder aplicarlos a los pavimentos, concretamente a los de tipo flexible.

El trabajo tiene una parte teórica de selección del material de acorde con las propiedades buscadas en cada caso y una parte experimental que buscará verificar los resultados obtenidos de manera teórica y tratar su validez. Es por tanto importante destacar que en un futuro el proyecto podría ser estudiado con más detalle y podría ser aplicado a un caso real, de manera que a corto plazo la utilidad del trabajo es el diseño a nivel teórico y experimental de los materiales geo-sintéticos aplicados a los pavimentos flexibles; y a largo plazo la posible aplicación de estos resultados a una aplicación real.

Por consiguiente cabe resaltar que la parte experimental pudo realizarse en el Centre Català del Plàstic (CCP) con la ayuda del profesor Marcelo de Sousa Pais Antunes, por tanto utilizando un equipamiento especializado que aparece descrito en la parte de requisitos antes citada.

Por último, para acabar de enfatizar en la utilidad del proyecto se debe destacar que en la siguiente sección se citan varios ejemplos de casos reales en aeropuertos que utilizan materiales geo-sintéticos y que por tanto acaban de demostrar que se trata de un tema de fuerte interés y estudio en la actualidad.

2. Investigación bibliográfica y estado del arte sobre pavimentos de aeropuertos

2.1 Historia, evolución y estado actual

Las pistas de aterrizaje de los aeropuertos han cambiado mucho desde los inicios de la aviación hasta el momento en el que nos encontramos hoy en día (Calvo 2011). En sus inicios (años 30 del siglo XX), una pista de aterrizaje era cualquier superficie plana, uniforme y sin obstáculos en la que poder aterrizar nuestra aeronave, la cual por aquel entonces no era demasiado pesada, usándose por ello superficies de aterrizaje con césped, como podían ser sembrados segados de cereales, grandes jardines de césped, hipódromos o velódromos. A partir de este momento la industria de la aviación continuó su evolución, y es entonces, por el año 1937 cuando en Gran Bretaña se construyeron bombarderos más pesados (más de 15.000 kg), lo que conllevó a la implantación de pavimentos con una base dura recubiertos con tarmacadam e impermeabilizados con mástic de asfalto caliente, los cuales rápidamente demostraron sus débiles propiedades frente a cargas sostenidas, por lo que finalmente, en los años posteriores a la segunda guerra mundial, se acabó usando el hormigón como material predominante en estos pavimentos. Una de las primeras muestras de esta innovación, llevada a cabo entre 1946 y 1951, se plasmó en el aeropuerto de Heathrow, donde se usó un pavimento que comprendía una capa de 305 mm de hormigón sobre 105 mm de hormigón pobre seco sobre una subrasante natural de resistencia media-alta. Otro ejemplo de esta evolución se puede observar a finales de 1940 en Estados Unidos, debido a la elaboración de los aviones B-17 y B-24, con cargas en los trenes de aterrizaje cercanas a los 170000kg y pesos de 370000kg que suponían unos esfuerzos de tres a cinco veces mayores de los experimentados hasta el momento. Este hecho hizo necesario seguir trabajando en los materiales usados en los pavimentos de aeropuertos (J.M. Barling 1997).

A partir de ese momento, la evolución en el diseño de aviones ha continuado en la línea del aumento del peso junto con el aumento en el número de aterrizajes que realizan las aeronaves ya que claramente se busca albergar al mayor número de personas, aunque a su vez, con la introducción de nuevos materiales más ligeros, este aumento se ha visto menguado.

Un ejemplo de esta evolución se puede encontrar en la ilustración siguiente, donde encontramos varios referentes en la historia de la aviación, como el Boeing 747-100 que realizó su primer vuelo en 1970 y no fue superado, en peso, hasta cerca del año 2000 por un nuevo modelo del mismo. Por último, se puede destacar que al Airbus 380-800, con un máximo peso en despegue (MTOW) de unos 570.000 kg, es el avión de pasajeros más grande del mundo:

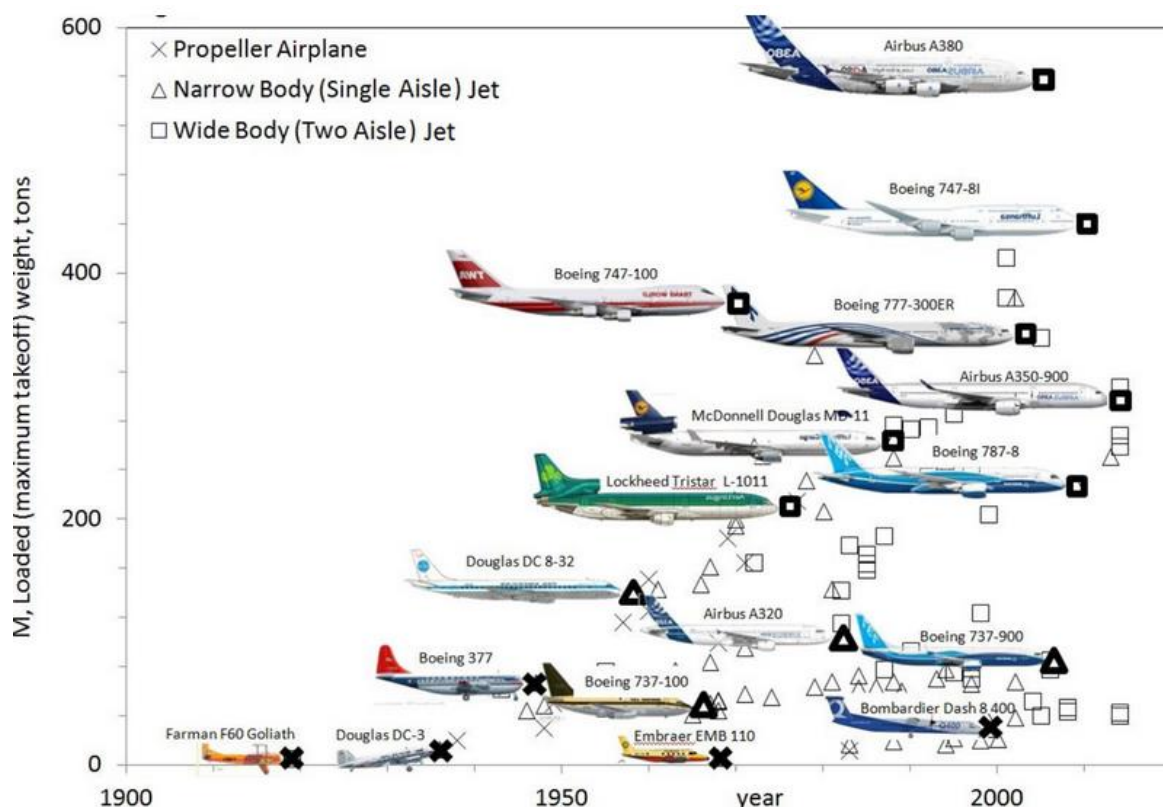


Figura 1. Evolución temporal del máximo peso en despegue para distintos aviones comerciales (J.M. Baring 1997)

Es por esto que es necesaria una innovación en los materiales utilizados en los pavimentos de aeropuertos para poder adaptarlos a la entrada de nuevas aeronaves de superior peso y el mayor flujo aéreo.

Muchos son los estudios que se han realizado con materiales geo-sintéticos de cara a la mejora de estos pavimentos (Correia & Zornberg 2014), (Buonsanti & Leonardi 2012), (Palmeira et al. 2008) e incluso podemos encontrar varios ejemplos de aplicación a proyectos reales en pistas de aeropuertos (NAUE 2011), (Cancelli 2000). Dentro de la gran lista de geo-sintéticos, los más usados son los siguientes:

- Geo-grids

Se trata de materiales que se utilizan como refuerzo de la base, de manera que se intercalan en capas unidireccionales o bidireccionales (en las figuras de más abajo se puede observar tanto la aplicación teórica como la aplicación real en el aeropuerto de Inchon en la isla de Yong-Jong, 52 km al oeste de Seúl), de manera que actúan como elementos resistentes a la tracción absorbiendo la energía de las cargas cíclicas que producen los trenes de aterrizaje. En el caso del aeropuerto de Yong-Jong se utilizaron en la capa subrasante estabilizada dispuesto de manera bidireccional, concretamente se realizó una primera prueba con dos capas y otra con una sola capa (Cancelli 2000).

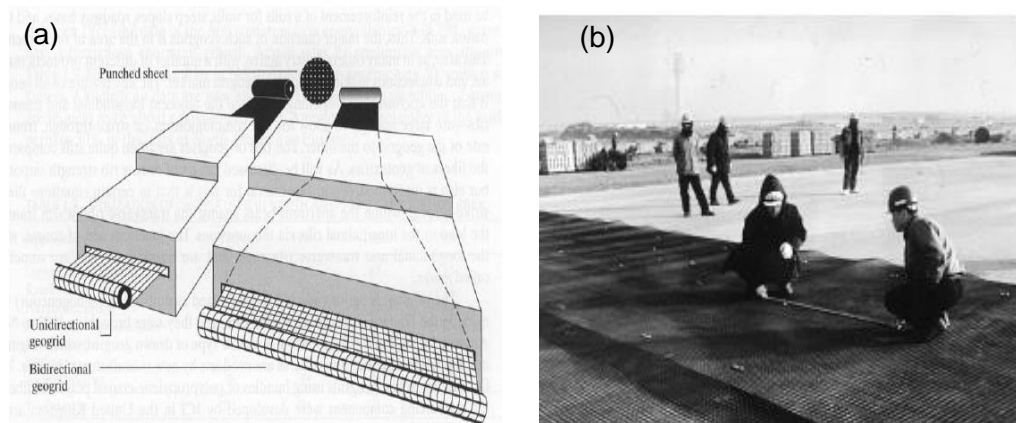


Figura 2. (a) Aplicación teórica de un *geo-grid* en la base de un pavimento de aeropuerto (Koerner 2005) y (b) aplicación real en el aeropuerto de Incheon (Cancelli 2000)

Otro ejemplo de aplicación de *geo-grids* se encuentra en el aeropuerto internacional de Berlín-Bradenburg donde, además de cumplir las características antes mencionadas, se utiliza a su vez como un elemento de efecto antideslizante, de manera que una aeronave al salir fuera de pista, no pueda sufrir graves daños (NAUE 2011).

- Geo-membranas

Este tipo de material fue utilizado en el aeropuerto de Berlín-Bradenburg, en este caso se utilizó como material impermeable al agua, por su excelente resistencia química, propiedades de sellado, resistencia a la propagación de grietas y protección a la radiación ultravioleta (NAUE 2006),(Koerner 2005).

- Geo-textiles

Pueden presentarse en forma de tejido o no (en la figura se muestran ambos respectivamente). En el caso del aeropuerto de Berlín-Bradenburg no se presentaba en forma de tejido, de manera que sus principales propiedades son las de filtración, protección, separación de capas, resistencia a la abrasión y adaptación a terrenos desnivelados (NAUE 2006), (Koerner 2005).

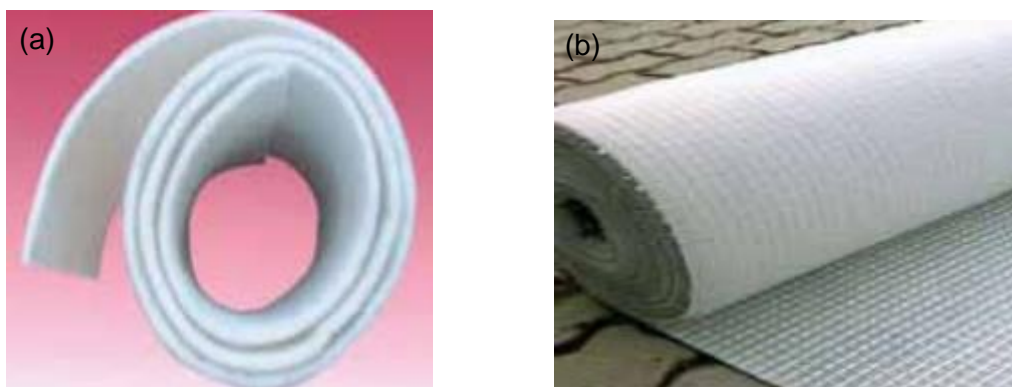


Figura 3. Fotografías de un (a) *geo-textil no tejido* (NAUE 2006) y de un (b) *geo-textil tejido* (NAUE 2006)

- Geo-cells

Se trata de una combinación de tiras de polietileno de alta densidad (HDPE) que se disponen como un panel de abeja en 3D proporcionando propiedades de retención de fluido y drenaje del mismo de manera controlada, de manera que en muchas ocasiones se utiliza en las capas de deshielo del pavimento. A su vez también aumenta la capacidad de resistir cargas cíclicas y actúa como material sellador (NAUE 2006).



Figura 4. Estructura 3D en forma de panel de abeja Geo-cell (NAUE 2006)

- Otros geo-sintéticos y combinaciones de los mismos

De cara a combinar e incluso reforzar las propiedades de diferentes capas del pavimento en multitud de aplicaciones se lleva a cabo la combinación de distintos materiales geo-sintéticos que puedan reforzar sus características de cara a obtener un material con un mayor abanico de posibilidades.

Como ejemplo de estos compuestos se puede encontrar la combinación de geo-textiles y geo-membranas. En este caso se sitúan láminas de geo-membranas en uno o ambos lados del geo-textil aportando resistencia a la perforación, resistencia a la propagación de grietas y resistencia a tracción entre otros (Koerner 2005).

2.2 Descripción de los tipos de pavimentos

Como ya se ha puesto de manifiesto, los pavimentos han ido evolucionando a la par que los nuevos modelos de aeronaves, de manera que una innovación en los materiales es necesaria para adaptarnos a las nuevas condiciones. Es por ello, que es necesario estudiar la manera en la cual están dispuestas las diferentes capas que forman el pavimento y la descripción de las mismas. Si se tratan las pistas de aeropuerto, la división que se suele hacer es la de pavimentos flexibles y pavimentos rígidos, aunque posteriormente puedan aparecer diferentes capas estabilizadoras y recubrimientos en cada uno de ellos. A continuación se detallan cada uno de estos tipos de pavimentos. Aun así cabe destacar que este proyecto se centrará en la innovación en los pavimentos flexibles. (J.M. Barling 1997).

2.2.1 Descripción de las diferentes capas del pavimento flexible de los aeropuertos

Este tipo de pavimentos están diseñados para transmitir las cargas entre las diferentes capas de materiales, más que para trabajar a flexión, de manera que estos materiales se deben escoger de forma cuidadosa para evitar que en esta transmisión de esfuerzos no se sobrepase la capacidad máxima de alguno de los diferentes estratos que componen el pavimento. La figura de la izquierda muestra esta distribución de la carga a través de las distintas capas, en concreto se trata de una transmisión de carga lineal que finalmente acaba soportando la capa de subrasante ya que el efecto del esfuerzo se ha visto reducido al pasar por cada una de las capas de material (Federational Aviation Administration 2007).

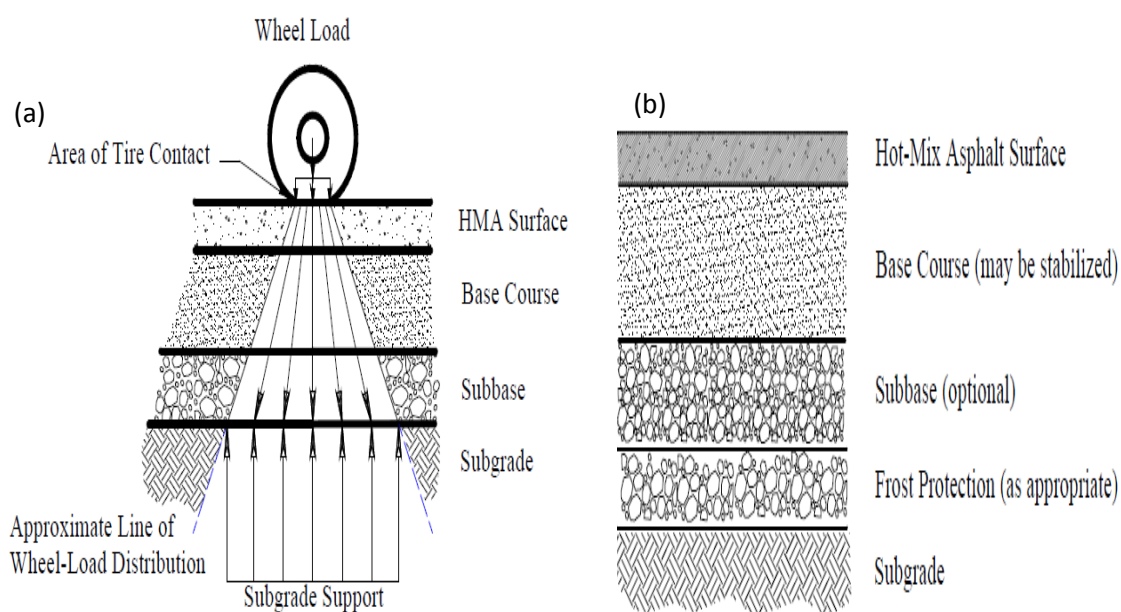


Figura 5. (a) Método de transmisión de la carga en pavimentos flexibles y (b) distribución de las diferentes capas en pavimentos flexibles (Federational Aviation Administration 2007)

A su vez, en la figura de la derecha se puede observar las diferentes capas que se encuentran en el pavimento flexible:

➤ Capa asfáltica

Esta capa es conocida como la capa de rodadura y está formada por una mezcla de diferentes conglomerados o agregados con cualquier aglutinante bituminoso.

Sus principales funciones son las de evitar que el agua penetre en la siguiente capa, la base; proporciona una capa lisa sin partículas, las cuales podrían acabar dañando a personas o a aeronaves, y a su vez, resiste la carga del tren de aterrizaje proporcionando un efecto antideslizante sin que la superficie se vea afectada.

➤ Base

Es la capa estructural primaria ya que debe ser capaz de transmitir el esfuerzo a las capas de subbase y subrasante, a la vez que resiste la propia carga y la presión vertical que le produce la capa de rodadura, junto con cambios en el volumen de la capa por la acción de la humedad. Es por ello que la calidad, propiedades, compactación y espesor de esta capa deben ser calculados minuciosamente debido a que un fallo en ésta también haría colapsar las inferiores.

➤ Subbase

Esta sección se usa principalmente en pavimentos donde puede aparecer escarcha o bien la capa de subrasante es bastante débil, desempeñando la misma función que en el caso de la base pero con menos exigencias en cuanto a la calidad ya que las cargas que debe transmitir son menores. Los materiales que se pueden encontrar en esta sección son estabilizadores o bien materiales granulares compactados.

➤ Capa de protección frente al hielo

En aeropuertos donde las heladas suelen ser habituales es importa incluir esta capa ya que estas heladas tiene dos efectos perjudiciales sobre el pavimento. El primero de ellos es el de producir un levantamiento de las capas por la helada, debido a que la formación de los cristales de hielo no es uniforme y por tanto levanta porciones del terreno; y al mismo tiempo la capa de subrasante pierde soporte cuando tenemos una situación de congelación-descongelación continua.

Por tanto esta capa actúa como barrera contra la formación del hielo y contra la propagación del mismo capas abajo.

➤ Subrasante

Constituye una capa de suelo que se considera los cimientos del pavimento. La carga que debe resistir esta capa es mínima ya que ha sido absorbida casi totalmente por las capas superiores y por tanto no producirá ninguna distorsión o deformación en ésta.

➤ Geo-sintéticos

Los materiales geo-sintéticos tienen muchas aplicaciones, como ya veremos más adelante ya que son el principal estudio de este proyecto. Estos materiales se suelen utilizar tanto como refuerzo de alguna de las capas, como separación de las mismas e incluso formando una nueva capa (Federal Aviation Administration 2009).

2.2.2 Descripción de las diferentes capas del pavimento rígido de los aeropuertos

En este caso, al tratarse de un pavimento rígido, como su nombre indica tienen una elevada rigidez, de manera que se comporta como si fueran una viga y reparte toda la carga del tren de aterrizaje en una superficie bastante larga de la capa de subrasante o cimientos. En la siguiente imagen (situada a la izquierda) se puede observar este método, donde el cemento Portland es el elemento estructural principal.

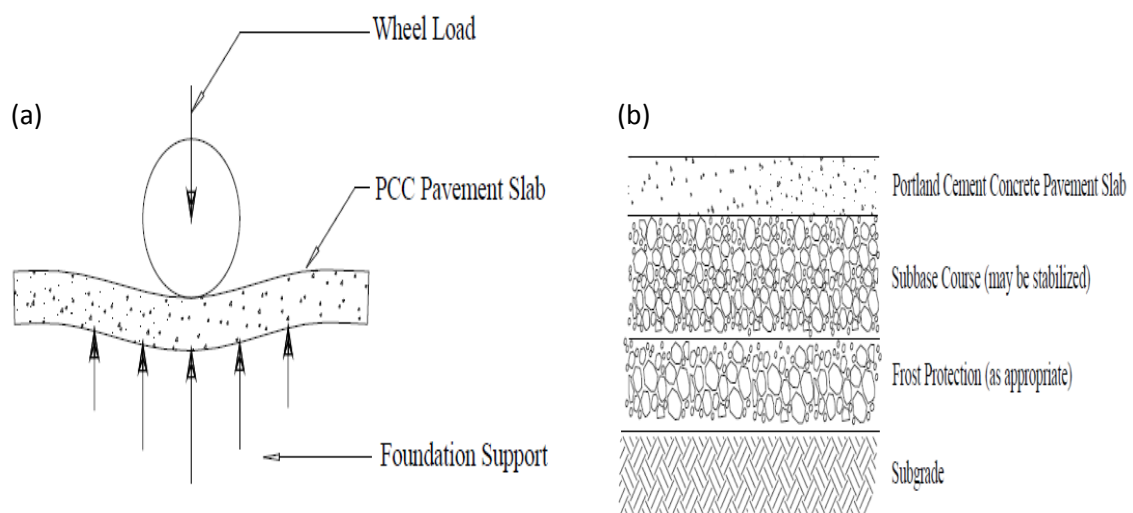


Figura 6. (a) Método de transmisión de la carga en pavimentos rígidos y (b) distribución de las diferentes capas en pavimentos rígidos (Federal Aviation Administration 2007)

Como ya se indicó anteriormente en el caso de pavimentos flexibles, es necesario destacar las diferentes partes o capas que conforman los pavimentos rígidos, que se pueden observar en la imagen de la derecha.

➤ Losa de cemento Portland

Esta capa es la principal superficie estructural que resiste el impacto del tren de aterrizaje, a su vez como ya pasaba con la capa asfáltica en pavimentos flexibles, tiene una función antideslizante junto con la acción de impedir que se infiltre el exceso de agua hacia la subbase.

➤ Subbase

La principal función de la subbase es la de hacer de soporte a la losa, aun así también sirve como capa controladora de la helada o como superficie de drenaje. En pavimento rígido esta capa debe disponer de un espesor mínimo de 100mm.

➤ Subbase estabilizada

Esta capa es necesaria en pavimentos rígidos donde aterrizan aeronaves que superan los 45000kg, de manera que absorbe una parte de la carga para que el subrasante no se vea deteriorado.

➤ Capa de protección frente al hielo

La función de esta capa es exactamente la misma que la que se encuentra en la descripción del pavimento flexible.

➤ Subrasante

La capa de subrasante es un suelo compacto que recibe una parte pequeña de la carga debido a que la mayoría ha sido absorbida por las capas superiores. En casos donde el subrasante esté dividido en láminas, o bien haya gradiente de agua o densidad se deberá revisar que esta capa cumpla con las especificaciones sin sufrir ninguna deformación ni distorsión.

3. Planteamiento de los problemas en pavimentos flexibles y posibles soluciones al mismo

Una vez descritos los pavimentos flexibles y rígidos, el proyecto se centrará en mejorar los primeros con la introducción de materiales geo-sintéticos. Para ello, cabe destacar cuales son aquellos problemas más frecuentes que suelen aparecer en pavimentos flexibles, de cara a poder encontrar soluciones a los mismos. (Federal Aviation Administration 2007).

3.1 Formación de grietas

La formación de grietas es uno de los principales problemas que aparecen, estas pueden ser causadas por distintos tipos de factores:

- ❖ Deflexión de la superficie a causa de unos cimientos no estables
- ❖ Disminución o reducción de la superficie
- ❖ Contracción o dilatación térmica
- ❖ Problemas de construcción en las juntas
- ❖ Formación de grietas por reflexión

Existen, a su vez, cinco tipos distintos de grietas que se pueden formar en estos pavimentos:

1. Agrietamientos longitudinales y transversales

Este tipo de grietas se ocasionan principalmente por la reducción o contracción de la superficie de la capa asfáltica. La reducción de esta capa puede estar originada por la oxidación o bien el endurecimiento por envejecimiento del material asfáltico. Por otro lado, la contracción es de origen térmico.

Cabe destacar que la formación de grietas longitudinales se ve acelerada con el hecho de que las juntas no tengan una correcta construcción.

2. Agrietamiento en bloque:

Este tipo de grietas se intercalan de manera que acaban dividiendo el pavimento en partes aproximadamente rectangulares, que van de los 0,3x0,3 metros a los 3x3 metros. Este tipo de fisuras son causadas esencialmente por la variación de temperatura a lo largo del día, indicando que la capa asfáltica se ha endurecido notablemente.

Este tipo de desperfectos se producen en grandes áreas aunque en algunas ocasiones también pueden aparecer en zonas donde no hay tráfico, que junto con su forma es la principal diferencia con el agrietamiento *Alligator*, que se produce en zonas de tráfico y con formas pequeñas, segmentadas y puntiagudas.

3. Agrietamiento por reflexión

Este tipo de problema es debido a los movimientos horizontales y verticales que se producen debajo de un recubrimiento, provocados por la expansión y contracción por temperatura y cambio de humedad junto con el tráfico aéreo.

De esta manera una grieta en el recubrimiento de la capa asfáltica refleja el patrón de agrietamiento en la capa de más abajo, haciendo que se propague. Por último, cabe resaltar que este tipo de grietas también suelen aparecer en pavimentos antiguos que no se han reparado o mantenido de manera correcta.

4. Agrietamiento por fatiga o Alligator

A partir de las cargas cíclicas o de fatiga que produce el tráfico aéreo, en la capa asfáltica aparecen unas grietas interconectadas. Las grietas se inician en la parte superior de la capa asfáltica propagándose paralelamente a la superficie, hasta que por acción de la carga repetida se produce un debilitamiento de los cimientos del pavimento y la grieta avanza segmentándose y adquiriendo formas puntiagudas, similares a las de un alligator, como se muestra en la figura 4. Estas grietas pueden llegar a alcanzar un máximo de 0,6 metros de longitud. (Moghaddam et al. 2011)

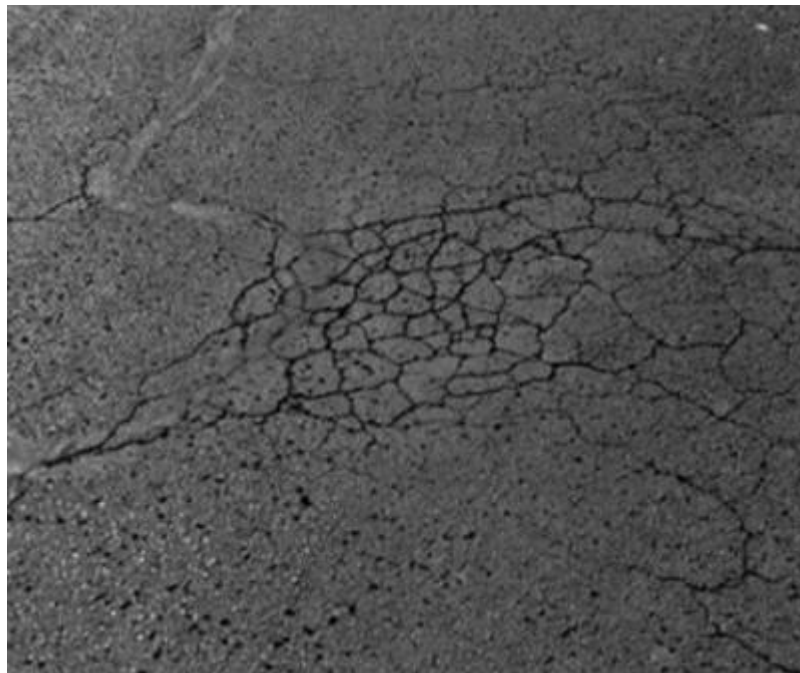


Figura 7. Agrietamiento Alligator (Moghaddam et al. 2011)

5. Agrietamiento por deslizamiento

La acción de los frenos y los giros de las ruedas generan sobre la superficie un resbalamiento y posterior deformación, generalmente esto es debido a que no hay una buena unión entre la superficie y el resto de capas, que permite que haya un movimiento relativo entre las mismas.

Este tipo de fisuras tiene la forma de una media luna o luna creciente en la que los extremos apuntan hacia fuera de la dirección del tráfico.

3.2 Desintegración

La desintegración en pavimentos flexibles es causada por distintos motivos que se describen a continuación:

- ❖ Baja compactación de la capa asfáltica de la superficie
- ❖ Bajo aglutinante del asfalto en la mezcla que origina la capa asfáltica
- ❖ Falta de adhesión entre el asfalto y las partículas agregadas
- ❖ Sobrecalentamiento de la mezcla

Como ya sucedía con la formación de grietas, existen varios tipos de desintegración:

1. Desgaste

Este tipo de desintegración en la capa asfáltica, provocado por la pérdida de partículas o de aglutinante en esta sección, es el más común. A su vez se manifiesta de forma clara produciendo un envejecimiento y endurecimiento del aglutinante del asfalto. Si este efecto continúa puede originar que esta superficie deje de ser uniforme por la rotura de alguna pieza de este pavimento, provocando que pueda ocasionar algún desperfecto en aeronaves o vehículos que circulen por la pista.

2. Formación de baches

Este tipo de fallo tiene su explicación en la formación de grietas, concretamente de las ya anteriormente mencionada grietas *Alligator* que se creaban por fatiga. Una vez ocasionadas estas fisuras, las secciones que quedan separadas del resto de pavimento por las grietas son propensas a acabar destruyéndose por acción de las cargas de los aterrizajes. Finalmente acaban dejando un agujero en su lugar que puede ser muy perjudicial para el tráfico aéreo. Cabe destacar que en aeropuerto con heladas abundantes, el proceso de congelación-descongelación puede acelerar la formación de baches.

Aun así, suele ser un problema que aparece relativamente poco en los pavimentos de aeropuertos.

3. Laminación del asfalto

La laminación del asfalto es causada por la infiltración de humedad en la capa asfáltica que hace que se separe el agente aglutinante bituminoso del resto de partículas, a su vez también es ocasionado por el proceso de cambio de fase agua-vapor generando unas presiones capaces de separar el aglutinante del resto de componentes.

4. Erosión del aglutinante

Se define la erosión de este aglutinante como las zonas oscurecidas de la capa asfáltica donde el aglutinante se ha quemado o bien carbonizado, estas manchas pueden alcanzar los 13 mm de profundidad.

5. Parches

Una práctica habitual es la de utilizar materiales para rellenar huecos que originalmente ocupaba el pavimento original, estos parches puede ser problemáticos debido a que es una solución temporal y por tanto pueden ocasionar desperfectos al tráfico aéreo, es por ello que requieren de una revisión o bien la sustitución por el material original lo antes posible.

3.3 Distorsión

La distorsión en pavimentos flexibles esta originada por diferentes motivos:

- ❖ Asentamiento de los cimientos
- ❖ Falta de compactación entre las capas del pavimento
- ❖ Falta de estabilidad de la capa asfáltica
- ❖ Falta de adhesión entre la superficie y la capas inferiores
- ❖ Heladas en el subrasante

Al mismo tiempo, existen varios tipos de distorsión del pavimento:

1. Formación de surcos

Estos surcos se manifiestan como un hundimiento del terreno que queda evidente en la pista si se observa la zona de trayectoria del neumático, incluso esta zona se evidencia aún más cuando la lluvia rellena esta zona con agua. Estos surcos son ocasionados por deformaciones permanentes en cualquiera de las capas del pavimento.

2. Ondulación

Este efecto se origina por la falta de estabilidad de la capa asfáltica y la poca adhesión entre las diferentes capas. Esto acaba traducándose en un movimiento oscilatorio de la superficie que deja ondulada la misma.

3. Formación de bultos

Este tipo de distorsión es debida a la falta de estabilidad de la mezcla, como ya se ha comentado anteriormente, o bien a los esfuerzos que pueden producir una capa de cemento Portland adyacente durante su expansión.

Este hecho se traduce en la formación de bultos en la superficie del pavimento, que dependiendo de su localización puede ser de mayor o menor peligrosidad para el tráfico aéreo.

4. Depresión

La depresión del terreno puede deberse a la presencia de un tráfico aéreo más pesado de para el que fue diseñado ese pavimento, una zona donde el asentamiento de los cimientos sea notable o simplemente debido a la utilización de unos métodos de construcción incorrectos.

3.4 Pérdida de adherencia

Diversos factores son los que pueden inducir una pérdida de adherencia en el pavimento y el correspondiente *hydroplaning*, entre los que destacan los siguientes:

- ❖ Utilizar un exceso de asfalto en la mezcla o capa asfáltica
- ❖ Imprimación demasiado pesada
- ❖ Falta de adhesión del conglomerado
- ❖ Acumulación de contaminantes

Debido a estos factores se puede mostrar esta pérdida de adherencia de distintos modos:

1. Conglomerado pulido

Este problema está causado por el tráfico aéreo como consecuencia de que el conglomerado que se encuentra justo por encima del asfalto, o bien es de mala calidad o bien su contenido es muy bajo, de esta manera queda una superficie demasiado pulida que no permite conseguir la adherencia deseada.

2. Presencia de contaminantes

La acumulación de distintas partículas de suciedad, como pueden ser caucho de los neumáticos, aceite o cualquier material externo conlleva una reducción de adherencia y por tanto los pequeños surcos destinados a evitar el *hydroplaning* pierden su eficacia.

3. Sangrado

Este proceso está originado por la presencia de un excesivo aglutinante asfáltico junto con el bajo contenido de huecos con aire en la capa asfáltica, de manera que el aglutinante ocupa esos huecos y posteriormente se expande y acaba saliendo a la superficie. Este proceso hace que aparezca una capa en la superficie que se comporta como un espejo reflectante y que a su vez suele tener una textura gelatinosa.

Por último, cabe resaltar que si este proceso se acelera puede llevar asociado una severa reducción de la adherencia del pavimento.

4. Derrame de combustible o aceite

Las propias fugas de combustible y de aceite de las aeronaves o vehículos que circulan por las pistas pueden ocasionar que en la superficie del pavimento quede una pequeña capa que hace perder parte de la adherencia. Aun así, estos restos se eliminan de forma natural y los daños que pueden causar son mínimos.

3.5 Drenaje

Probablemente hablar del drenaje es hablar del factor más relevante a la hora de evaluar un pavimento ya que muchos de los problemas que suelen tener lugar en las pistas pueden estar relacionados con algún defecto en el sistema de drenaje. Principalmente el drenaje se relaciona con la capacidad del pavimento en cuanto a la resistencia al tráfico aéreo y a las condiciones climatológicas. Es por ello que un sistema de drenaje incorrecto puede llevar a situaciones críticas como pérdida de la capacidad de repartir las cargas o saturación del subrasante o de la subbase.

El principal problema de los sistemas de drenaje se encuentra en la posible acumulación de agua entre las capas estructurales, de forma que al producirse un aterrizaje y comprimirse las capas, el agua que quedaba acumulada se expande a una elevada presión desgastando el material y pudiendo provocar la ruptura o levantamiento de alguna de éstas.

Además, el proceso se realimenta ya que esta agua que sale a presión origina grietas por donde el agua puede volver a introducirse desde la superficie hacia el interior de las capas.

Para evitar estas problemáticas situaciones normalmente se cuenta con dos sistemas de drenaje independientes:

- Sistema de drenaje de la superficie

Este sistema consiste en construir de forma adyacente al pavimento una superficie que se encargue de recoger el agua proveniente de las lluvias, el hielo que se transforma en agua, el hielo en estado sólido o incluso las partículas externas, que al introducirse por la superficie pueden causar obturación.

Aun así, es inevitable que parte del agua se filtre a través de las grietas o juntas de la superficie y por tanto solo un mantenimiento exhaustivo podrá controlar este problema.

- Sistema de drenaje de la subsuperficie

Este sistema se puede dividir en dos subsistemas. El primero de ellos está formado por capas impermeables que pueden estar o no estabilizadas, en ellas se puede encontrar una serie de tuberías que se encargan de recolectar el agua y otras que se encargan de extraer el agua de manera rápida. A su vez, el segundo subsistema, consta de tuberías perforadas o pequeños conductos en una capa de tierra junto con otro conducto de salida al exterior. El principal uso de esta capa es extraer el exceso de agua de los cimientos del pavimento y reducir la acción del hielo.

4. Selección de los materiales y combinaciones de cara a su uso en pavimentos flexibles de aeropuertos

Una vez se han podido identificar los principales problemas que aparecen en los pavimentos flexibles de aeropuertos, en esta sección se va a tratar de seleccionar los materiales más convenientes de cara a solucionar algunos de los principales puntos débiles antes estudiados.

En primer lugar y de forma prioritaria se estudiará la implantación de materiales geo-sintéticos.

4.1 Materiales geo-sintéticos

En cuanto a los materiales geo-sintéticos, cabe destacar que hay una gran variedad de estos materiales y posibles combinaciones de los mismos. Es por ello, que a continuación se presentan uno a uno una serie de materiales y combinaciones de ellos junto con las aplicaciones en concreto para las que pueden utilizarse:

a) *Geo-grids*

Su principal uso es como refuerzo actuando como un elemento que aporta mayor capacidad de absorción de energía y por tanto en este caso actúa como estructura resistente a la fatiga y por consiguiente retardante del agrietamiento, reduciendo el de tipo reflectivo y el *Alligator*. A su vez también se utiliza como limitador de los surcos. Su principal aplicación se encuentra en la base, en el subrasante e incluso en la capa asfáltica de pavimentos.

Como ejemplo de aplicación en aeropuertos de este material se puede encontrar el del aeropuerto de Inchon (Cancelli 2000) ,descrito en la sección de investigación bibliográfica y estado del arte sobre pavimentos de aeropuertos; y también otro ejemplos como el estudio de elementos finitos que se realizó con las características del aeropuerto de Reggio Calabria (Buonsanti & Leonardi 2012), donde se simuló el aterrizaje de un Airbus A321 sobre un pavimento flexible que reunía una capa asfáltica de 100 mm, una base de 150 mm y 210 mm de subbase y subrasante.

Finalmente, los resultados aparecen descritos en la figura 8, donde el pico de deformación se ve reducido alrededor de un 10% con la incorporación del *geo-grid*; concretamente en este caso, a diferencia del caso del aeropuerto de Inchon donde se utilizaban *geo-grids* de polipropileno, se utilizan *geo-grids* de fibra de vidrio.

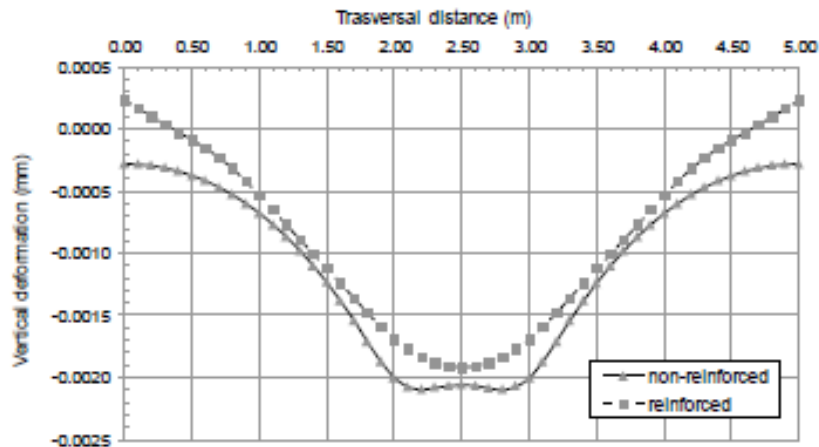


Figura 8. Análisis del refuerzo de fibra de vidrio (geo-grid) en referencia a la deformación del pavimento (Buonsanti & Leonardi 2012)

b) Geo-textiles

Los geo-textiles son materiales que presentan una gran cantidad de funciones en pavimentos flexibles, entre ellas se pueden destacar las siguientes:

Separación de las distintas capas

En este caso el geo-textil simplemente actúa como una capa que separa dos materiales, que al estar unidos, sus propiedades se ven empeoradas por la presencia del otro material. De cara a ilustrar una posible situación a continuación se presenta un ejemplo práctico. En la capa de subrasante, figura 9, disponemos de un conglomerado de partículas de piedra de mayor tamaño junto con unas partículas finas granuladas, en este caso si no se tiene un material que actúe como separador de estas capas, el material fino tiende a introducirse en el de mayor de tamaño, cosa que elimina la función de drenaje de las partículas de piedras, figura 9(a). A su vez las partículas de mayor tamaño también se introducen en las partículas finas disminuyendo la carga que será capaz de aguantar el conglomerado, figura 9(b). Por último, a la derecha de las figuras 9(a) y 9(b), se puede observar como el problema desaparece en el caso de disponer de una capa de separación de material geo-textil.

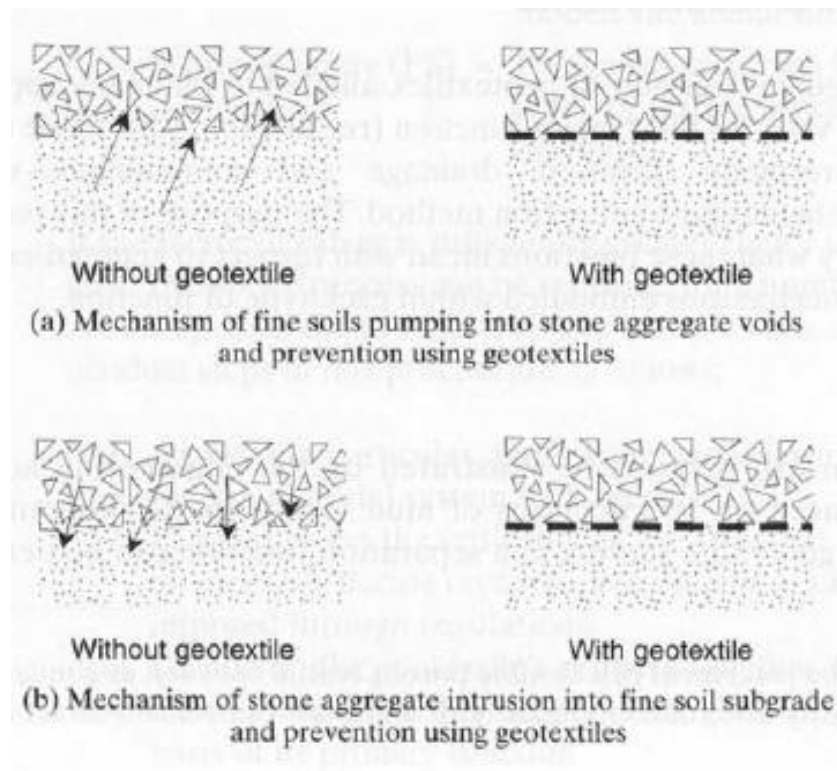


Figura 9. (a) Intrusión de partículas finas en el conglomerado de mayor tamaño e (b) intrusión de partículas del conglomerado en las partículas finas (Koerner 2005)

Refuerzo

En este caso el geo-textil se utiliza para reforzar materiales que tienen un buen comportamiento frente a la compresión pero que tienen que ser reforzados frente a la tracción, este tipo de materiales se pueden encontrar en la capa de subrasante, como pueden ser las arenas que se utilizan como un suelo fino. Es importante remarcar que la influencia en la mejora de la resistencia a tracción del material en concreto dependerá en gran medida de la disposición en que coloquemos el geo-textil. Un caso que muestra esta situación es el de la figura 10, donde la arena es sometida a una presión de 21kPa y se estudia la incorporación de geo-textil para mejorar su resistencia a tracción.

El caso 1 es el de la arena sin refuerzo, mientras que en el caso 2, donde el material geo-textil se ha introducido en zonas donde no se produce el trabajo de la arena se observa que el comportamiento es muy similar, como es obvio y lógico, a partir de aquí el caso 3 y 4 estudian la incorporación de más láminas, que como se observa ayudan a mejorar el comportamiento frente a la tracción del material.

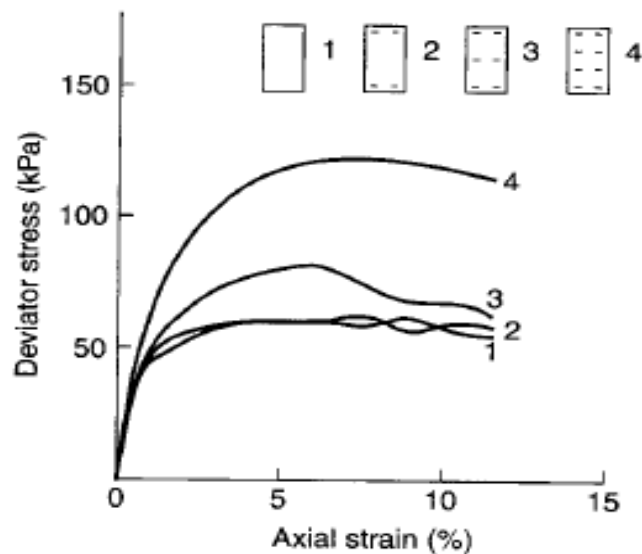


Figura 10. Incorporación de geo-textil para la mejora del comportamiento a tracción de arena sometida a 21 kPa de presión, en función de su disposición (Koerner 2005)

Filtración

Cuando el geo-textil está actuando como un filtro hay que tener en cuenta diversos factores para que la función se lleve a cabo adecuadamente. En primer lugar la capa de material tiene que tener una serie de huecos que hagan posible que el líquido fluya a través del geo-textil pero a su vez estos huecos deben retener la capa de material que se encuentra justo encima. Por último también se debe evitar que este paso de fluido y a su vez de pequeñas partículas pueda ocasionar una obstrucción de la capa.

Para poder llevar a cabo este proceso se realiza una capa de material en la que haya unos huecos por donde pueda circular el fluido pero que esté pretensada de manera que en la capa superior se acumule una capa gruesa de material que impida el paso de partículas menores que los huecos del geo-textil, como se puede observar en la figura 11.

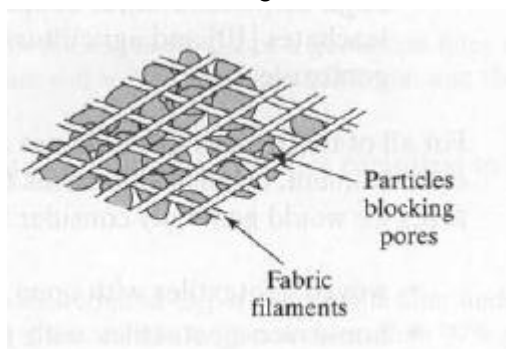


Figura 11. Sistema de filtración utilizando las partículas más gruesas para evitar el paso de partículas pequeñas a través del tejido de geo-textil (Koerner 2005)

Drenaje

Muchos materiales pueden ser aptos en función del grado de drenaje que se busque en concreto. En el caso de los geo-textiles, el grado de paso de líquido es bajo, concretamente si se trata de geo-textiles tejidos, al tener un mayor entrelazamiento y por tanto ser los huecos de menor tamaño el grado de paso de fluido es mucho menor que en el caso de un geo-textil no tejido. Aun así también cabe la posibilidad de utilizar geo-nets o bien buscar geo-compuestos que permiten una mayor transmisión de fluido a través de ellos

Combinación de funciones

Por último cabe destacar que el geo-textil puede realizar muchas de las funciones antes mencionadas al mismo tiempo en pavimentos flexibles de aeropuertos, para ello se deberá adoptar una solución de compromiso en cuanto a la disposición y geometría del geo-textil lo que conllevará aumentar el factor de seguridad ya que no se cumplirán las especificaciones de manera tan rigurosa de cómo se haría en el caso de solo cumplir una única función.

c) Geo-membranas

Este apartado se centra en las geo-membranas formadas por capas de material polimérico. Su característica y función primaria es la de barrera contra un líquido o un gas, esto es debido a su permeabilidad, que se encuentra en un rango que va desde 1×10^{-12} hasta $1 \times 10^{-15} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ que es de tres a seis órdenes de magnitud más baja que en el caso de una arcilla convencional. A su vez poseen buen comportamiento frente a la formación de grietas, resistencia a la erosión química y un servicio de larga vida (Multi-line and Geosynthethix 2005).

Concretamente los materiales más usados en la actualidad son el polietileno de alta densidad (HDPE), el polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) y el policloruro de vinilo (PVC).

Un ejemplo clarificador de la aplicación de estos materiales se puede encontrar en el aeropuerto de Arlanda en Estocolmo, Suecia. Concretamente se planteaba la construcción de una tercera pista de aterrizaje con el problema de que se debía construir sobre una zona glacial de la que se extraía agua para el aeropuerto y para las 250000 habitantes de la zona. De esta manera, una vez se realizó un análisis de los riesgos, se tomó la decisión de utilizar geo-membranas de HDPE como medio de contención entre los contaminantes y el agua potable del glaciar ya que ofrecía una buena resistencia química frente a los productos contaminantes presentes. Finalmente, debido a que tenía que cubrir toda la zona glacial y los alrededores donde había materiales permeables, el material acabó ocupando 330000 m^2 (Bystrom et al. 1996).

d) **Geo-nets**

Las principales funciones de este tipo de materiales son las de drenaje ya que se permite el paso de fluidos a través de ellos y la de refuerzo de la base. Se suele recubrir el material tanto por encima como por debajo con una capa de HDPE en forma de geo-membrana o geo-textil debido a que sino la capa que se encuentra encima del material obstruiría el paso de fluido y por tanto el material no podría trabajar de forma correcta. En el caso de la combinación con el geo-textil, este material le aporta la separación entre la capa superior y el propio geo-net y a su vez actúa como refuerzo, introduciéndose en los huecos del geo-net y reduciendo el paso de fluido. Por otro lado, en el caso de la combinación con la geo-membrana, como se puede observar en la figura 12 las dos láminas de geo-membrana envuelven el geo-net en una estructura de sándwich, por tanto estaría utilizándose como separador y a su vez para regular de manera conveniente el drenaje.



Figura 12. Estructura sándwich compuesta por dos láminas de geo-membrana que envuelven al geo-grid (Koerner 2005)

e) **Geo-espumas**

Las principales aplicaciones de estas geo-espumas, principalmente EPS (poliestireno expandido) y XPS (poliestireno extruido) son las siguientes:

Aislamiento térmico

Estas espumas están compuestas principalmente por gas en cuanto a su volumen, alrededor del 98-99%, es por ello que en los huecos de la espuma queda atrapado el aire que actúa como aislante térmico. De este modo el material se emplea en pistas donde el levantamiento del terreno por helada es habitual evitando el proceso de congelación-descongelación.

Control de los asentamientos

Este tipo de material se utiliza cuando se busca una gran compresibilidad, como puede ser el control del asentamiento diferencial. Un ejemplo de esta aplicación en pista de aeropuerto se encuentra en el aeropuerto de Nueva Orleans, figura 13, donde era necesario cambiar parte de la pista por problemas de asentamientos e introducir EPS junto con un aditivo que incluía el material para solucionar el curioso problema que estaban ocasionando las termitas (Stark et al. 2001) y (Armstrong 1995).

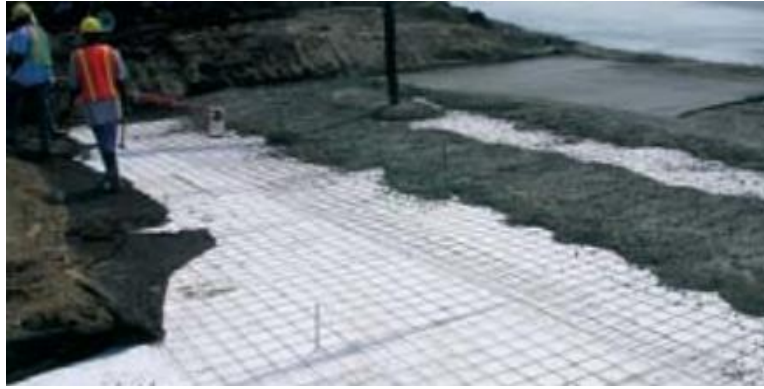


Figura 13. Instalación de poliestireno expandido en el aeropuerto de Nueva Orleans (Armstrong 1995)

f) **Geo-compuestos**

En cuanto a los geo-compuestos, se realizará una división de las funciones que se requieren y que compuestos pueden llevar a cabo estas funciones.

Geo-compuestos usados como separadores de capas (control de erosión):

Anteriormente se mostró como los geo-textiles cumplen de forma correcta la aplicación de actuar como separador entre distintas capas de material. En este apartado se estudia la posibilidad de que el geo-textil a su vez tenga que resistir la acción del entorno como puede ser el viento o el agua, en caso de que se encuentre en la superficie o bien en una capa más profunda donde puedan quedar acumulados fluidos que intenten erosionar su superficie.

Como materiales de refuerzos se pueden utilizar geo-nets, mallas de control de erosión o sistemas de contención geo-celulares.

Geo-compuestos usados como refuerzo:

En primer lugar se comentaran los refuerzos más utilizados para los geo-textiles. En este caso existen tres tipos de materiales utilizados como combinación, otro polímero, fibra de vidrio y acero. Respecto al compuesto con otro polímero, uno de los compuestos habituales es un núcleo de poliestireno recubierto con una funda de polipropileno. Otro de los sistemas es la combinación de un poliéster o poliamida, nylon, de alta tenacidad encastrado en una funda de poliolefina, que puede ser polietileno o polipropileno. En cuanto al refuerzo con fibra de vidrio, cabe destacar que se trata de un material con excelentes propiedades mecánicas como ya se ha podido observar en el caso del aeropuerto de Reggio Calabria donde se combinaba con un *geo-grid*. Por último, la combinación con acero se lleva a cabo actuando el acero como matriz y las fibras de geo-textil como refuerzo. Estos compuestos se utilizan en la subbase llegando a aumentar de 3 a 10 veces los ciclos de repetición que

aguanta esa sección. La combinación más usual es la de acero reforzado con polipropileno tejido.

En segundo lugar se encuentran los compuestos que utilizan geo-membranas, que como ya se ha citado anteriormente actúan como barrera del fluido pero que no tienen unas características estructurales muy buenas por lo que es conveniente que se introduzcan en un substrato de un geo-textil para adquirir ambas propiedades. A su vez también se combinan las geo-membranas con geo-grids y con geo-nets, compuestos que se tratarán posteriormente en el apartado de materiales que actúan como barrera frente a la humedad.

En tercer lugar se muestran los compuestos para reforzar el suelo o subrasante. Los intentos por mejorar este suelo se han llevado a cabo mediante fibras o redes, con las que se pretende mejorar las propiedades frente a la fragilidad usando *micro-grids*, a su vez también se han usado fibras continuas que funcionan bastante bien como material estabilizante en terreno con fuerte pendiente. Por último, se han realizado estructuras en tres dimensiones de geo-cells, principalmente de polietileno de alta densidad, que cumplen la función de compactar este suelo y mejorar su resistencia frente a la cortadura. Su estructura más convencional es la de tiras de 100mm de ancho y de 1,2mm de espesor, que posteriormente se unen formando unidades de mayor tamaño, como se puede observar en la figura 14. Finalmente esta estructura se compacta con arena y se le añade un asfalto emulsificado (60% asfalto y 40% agua) cosa que hace que el agua se filtre por la arena dejando unos glóbulos de asfalto justo encima de la arena, formando una capa (figura 15).

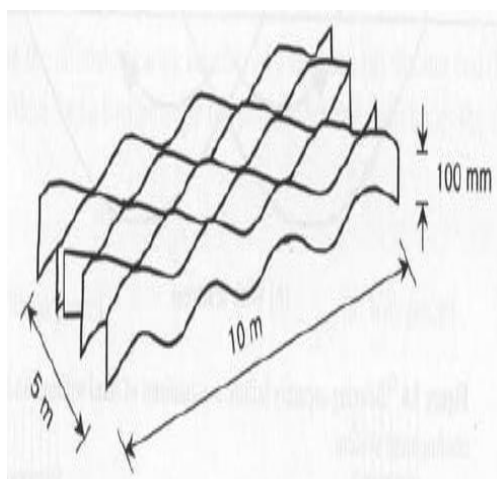


Figura 14. Estructura 3D geo-cell formada por la unión de tiras (Koerner 2005)

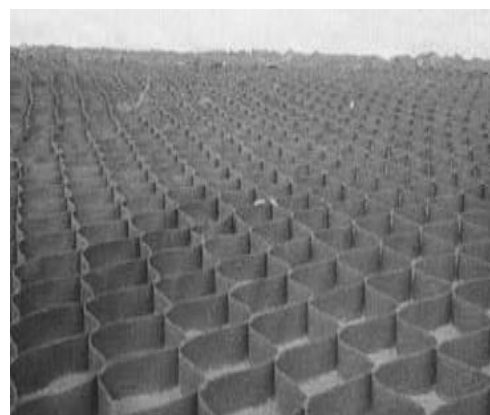


Figura 15. Compuesto formado por HDPE en forma de geo-cell, arena y asfalto (Koerner 2005)

Geo-compuestos usados en filtración

En este tipo de aplicaciones se busca cumplir con las funciones de filtración y conjuntamente con otras que se requieren en la aplicación en concreto. Un ejemplo muy habitual suele ser el de utilizar un geo-net en la parte superior que sirva de filtro, un geo-textil en la parte media que será del tipo no tejido y reforzado y finalmente un material arcilloso en la parte inferior consiguiendo de esta manera las funciones de filtración y de refuerzo al mismo tiempo. Otro posible ejemplo puede ser el de utilizar un geo-textil que cumpla dos funciones, como puede ser la de resistir la abrasión en una parte exterior, por efecto por ejemplo del desgaste del tren de aterrizaje y al mismo tiempo tener que filtrar la pequeñas partículas sólidas en la parte inferior. En estos casos se procede a utilizar un geo-textil o bien con una resina o bien uno secado que aguanta mejor la abrasión y en la parte inferior se utiliza uno no tejido y pretensionado, de manera que ambas funciones se puedan acabar desarrollando.

4.2 Selección final del material

Finalmente tras contemplar todos los posibles materiales que se muestran en la anterior sección, se han abierto dos posibles alternativas:

1. Obtener ciertas muestras de *geo-grids*, geo-membranas y geo-textiles de cara a poder comparar cual sería aquel que mejor encajaría en su utilización en pavimentos flexibles de aeropuertos. La razón por la que se han escogido estos tres tipos de materiales es porque son los más utilizados en estas aplicaciones y por tanto será más fácil obtenerlos.
2. Utilización de una línea de geo-membranas de polipropileno, ya existente, que se está elaborando en el Centre Català del Plàstic que podrían ser incorporadas a los pavimentos flexibles de aeropuertos como material novedoso y de interés.

Finalmente, tras proponer esta idea al responsable de la elaboración de este material se ha creído oportuno que la segunda opción es la que mejor se adapta a la aplicación en concreto ya que es posible variar el tamaño del poro de las geo-membranas de cara a adaptar sus propiedades a las deseadas para esta aplicación en concreto, para ello se deben variar los parámetros usados en su proceso de obtención, parámetros, que al igual que el material y sus propiedades se describen a continuación en los siguientes apartados

5. Caracterización del material seleccionado

En esta sección se describirá el material seleccionado, que en este caso se trata de unas geo-membranas de polipropileno homopolímero, concretamente Isplen PP020 G3E (Repsol) con un MFI (melt flow index)=1 dg/min (a 230 °C y 2.16 kg, según norma ISO 1133) y una densidad = 905 kg/m³ (según norma ISO 1183), que como se puede observar en la siguiente figura pueden variar su tamaño de poro en función de los parámetros de obtención que se hayan utilizado para el caso en concreto.

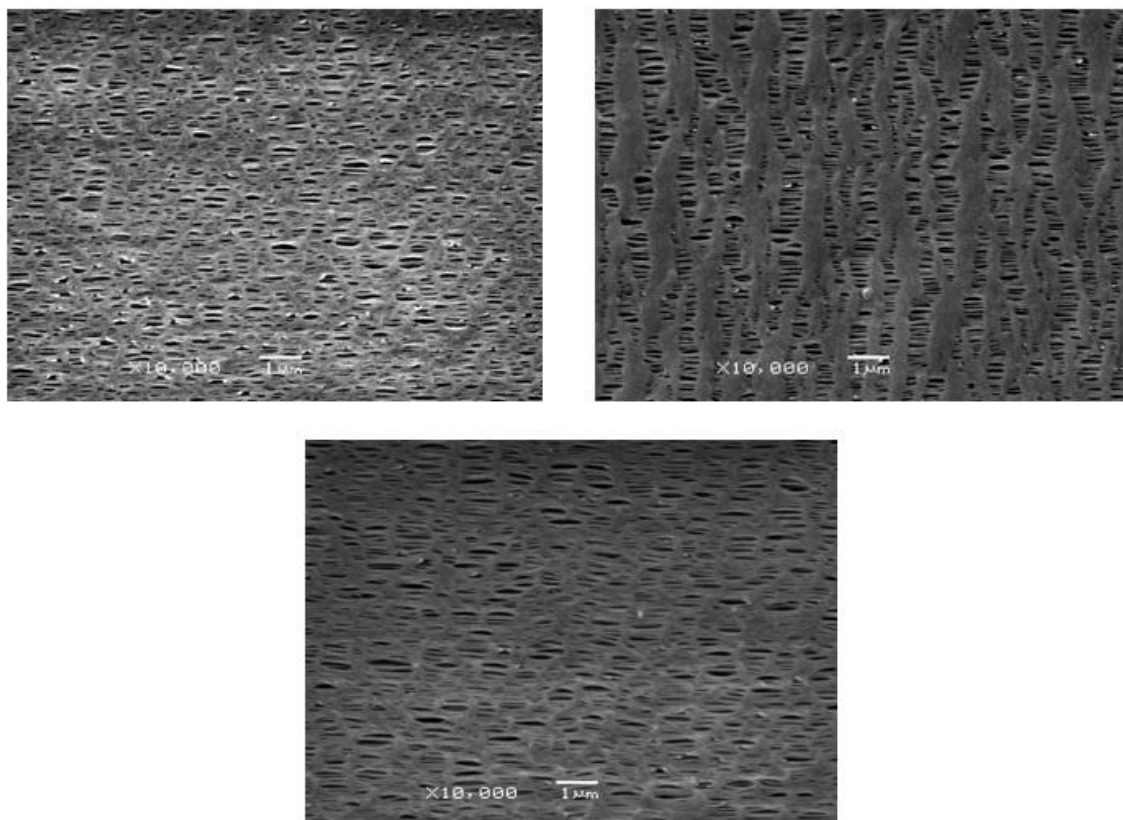


Figura 16. Micrografías realizadas con micrografía electrónica de barrido (SEM) de algunas de las muestras de geo-membranas de polipropileno a 10000 aumentos

De la figura 16 se puede extraer que ninguna de las tres muestras posee el mismo tamaño de poro, por lo que el material variará sus propiedades en función del ajuste de los parámetros del proceso de obtención.

Es por ello, que en primer lugar se debe mostrar el proceso de obtención seguido para poder distinguir cuáles son los principales parámetros de control de la maquinaria que finalmente harán que el material tenga unas propiedades en concreto y no unas otras. Posteriormente se describirán las propiedades finales del material a utilizar, tanto el comportamiento mecánico, la impermeabilidad al paso del agua y las propiedades térmicas.

5.1 Proceso de obtención de los films

El proceso de obtención de las geo-membranas se puede dividir en dos etapas claramente diferenciadas, la primera de ellas es la de preparación de los films precursores por extrusión y la segunda es la etapa de estiramiento del film, tanto en frío como en caliente, de cara a obtener la membrana final.

➤ 1. Preparación de los films precursores por extrusión

Cabe destacar que en este primer proceso se obtienen los films siempre manteniendo los parámetros de control que se especifican más adelante, por lo que este proceso no contribuirá a la modificación del tamaño de poro que se obtiene finalmente, sino que éste se verá modificado en la siguiente fase de estiramiento en frío y caliente. A su vez este proceso se puede subdividir en dos más, el primero de ellos es el que lleva a cabo la extrusora de monohusillo EUROTECNO y posteriormente la segunda parte se realiza en unos rodillos de calandrado.

Esta primera etapa se realiza con la extrusora monohusillo EUROTECNO, ilustrada en la figura 17, que en este caso es la encargada de la preparación de los precursores sólidos de las membranas. Sus principales características de diseño aparecen recogidas en la siguiente tabla:

Tabla 1. Principales características de funcionamiento de la extrusora EUROTECNO utilizada en la preparación de los precursores sólidos de las membranas

Característica		Valor
Capacidad de Producción *		20-25 kg/h
Capacidad de la Tolva (Piovan, modelo T30IX) **		50 l (~ 45 kg)
Camisa con control de temperatura en 3 zonas ***		300 °C
Husillo sinfín	Diámetro (D)	30 mm
	L/D	35
Máxima velocidad de giro del husillo		150 rpm

*Dependiente del material extruído

**La tolva presenta una unidad de control DSN506HE, deshumidificadora de material

***300 °C es el límite máximo de temperatura

Concretamente, los parámetros fijados en la primera etapa de preparación de los films precursores por extrusión se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2. Principales parámetros de trabajo de la extrusora EUROTECNO utilizada en la preparación de los precursores sólidos de las membranas

Apertura de la boquilla (mm)	Velocidad del husillo (rpm)	Velocidad a la salida de la extrusora (m/min)	Velocidad de la calandra		DDR (relación de estirado)		Espesor promedio del film (μm)
			rpm	m/min	Según velocidades	Según boquillas	
1.9	20	0.081	8.2	7.5	92.5	76.0	26-28

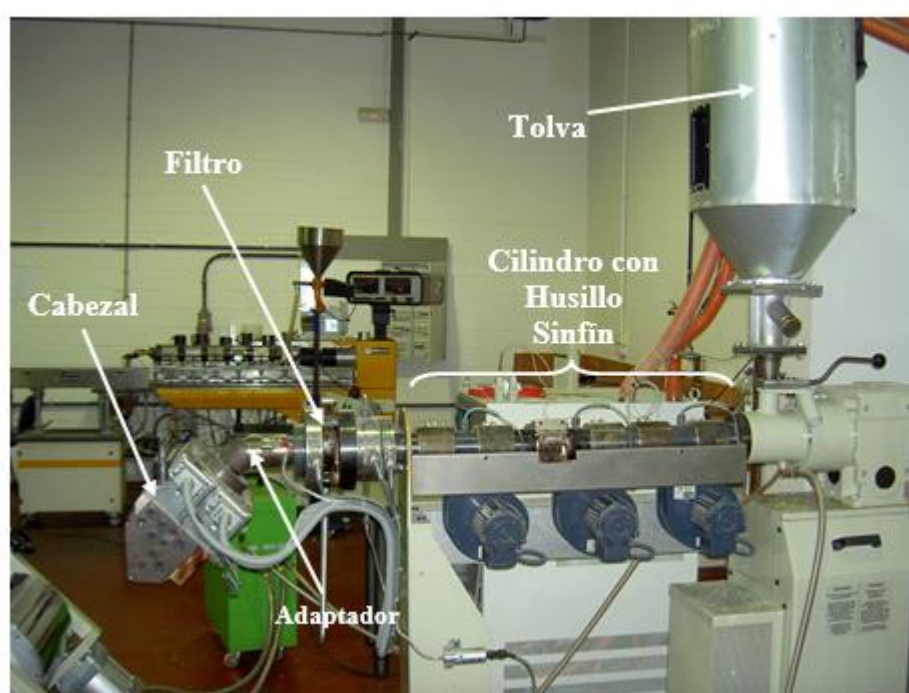


Figura 17. Extrusora monohusillo EUROTECNO utilizada en la preparación de los precursores sólidos de las membranas.

En cuanto al funcionamiento de la extrusora monohusillo cabe destacar que inicialmente el material se introduce en la tolva para posteriormente pasar por el cilindro con husillo sinfín. En este cilindro, como se muestra en la figura 18, se pueden distinguir tres zonas de trabajo diferenciadas, cada una de ellas posee un control de temperatura mediante dos resistencias.

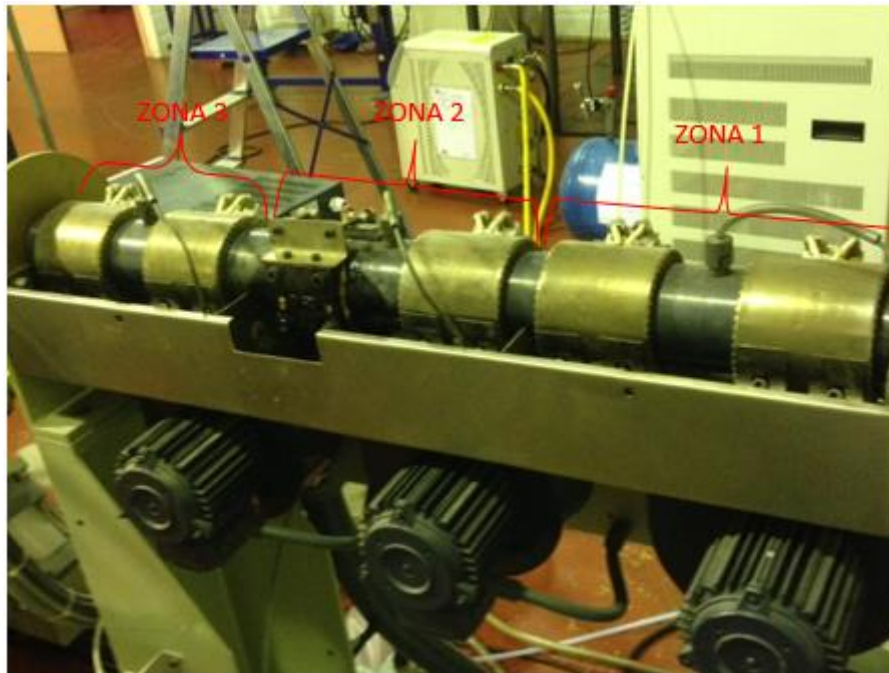


Figura 18. Cilindro monohusillo sinfín utilizada en la preparación de los precursores sólidos de las membranas.

- Zona 1 – 140 °C
En esta primera etapa el material se calienta hasta las 140 °C para que sea posible desplazarlo mediante el movimiento de rotación del cilindro sinfín.
- Zona 2 – 215 °C
En esta segunda zona comienza la fusión del material mediante el aumento de temperatura a la vez que también se realiza una compresión conforme el material avanza.
Cabe destacar que al final de esta etapa se encuentra una zona de desgasificación, donde se eliminan posibles gases que puedan ser dañinos en el proceso de obtención de los precursores.
- Zona 3 – 240 °C
Finalmente, en esta última etapa se lleva a cabo la homogenización del material, aplicando tanto un aumento de temperatura como de presión. Al final de esta etapa se halla un adaptador que transforma el movimiento de rototranslación del cilindro en uno lineal para que pueda salir el material por el cabezal.

Este cabezal plano Verbruggen modelo MO-400 LAB, que aparece representado en la figura 19 junto con el sistema de enfriamiento, tiene las siguientes características de trabajo, recogidas en la tabla 3:

Tabla 3. Principales características del cabezal plano empleado en la extrusora monohusillo

Cabezal plano <i>Verbruggen</i> modelo MO-400/LAB		
Característica		Valor
3 Zonas de termopares reguladas electrónicamente *		300 °C
Peso Total		110 kg
Dimensiones	Ancho	200 mm
	Apertura **	0.4 - 5 mm

*300 °C es el límite máximo de temperatura

**Apertura del cabezal regulable (dos labios: 0.4–3mm y 1 –5mm de apertura)

En este caso, el cabezal plano presenta el siguiente perfil de temperaturas:

- Zona 1 – 240 °C
- Zona 2 – 240 °C
- Zona 3 – 240 °C

Por último, como ya se ha comentado anteriormente, a la salida del cabezal se produce un enfriamiento del film, simultáneo en ambas caras, usando aire refrigerado a una presión de 5 bar.



Figura 19. A la izquierda el cabezal plano Verbruggen modelo MO-400/LAB (3 zonas de control de temperatura) y a la derecha el sistema de enfriamiento a la salida del cabezal

Para finalizar esta primera etapa, el film pasa por los rodillos de calandrado, ilustrados en la figura 20, los cuales a partir de presión crean una superficie lisa y plana adaptando el espesor al valor deseado para el siguiente de proceso de estirado en frío y en caliente.

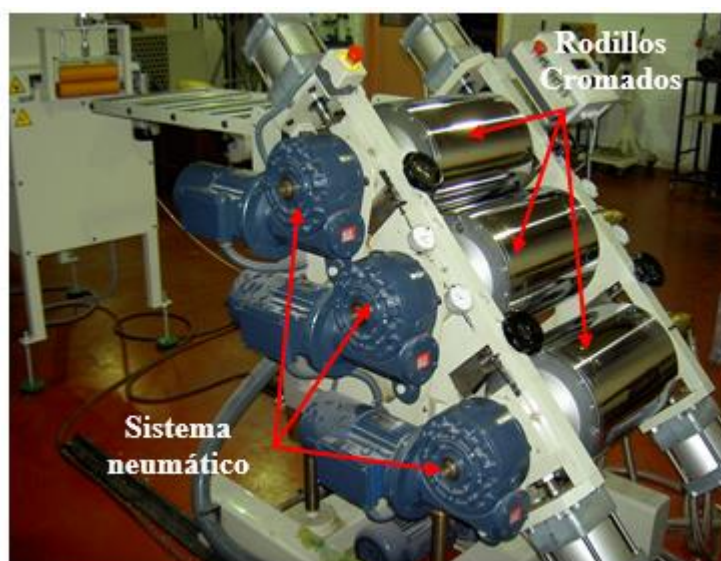


Figura 20. Rodillos de calandrado

➤ **2. Estirado del film (tanto en frío como en caliente) para la obtención de la membrana**

El proceso puede variar en función de la combinación de estiramiento frío y caliente debido a las diferentes velocidades que se pueden alcanzar durante el mismo. La siguiente tabla resume las combinaciones que se pueden llevar a cabo:

Tabla 4. Grado de estiramiento en función de la temperatura de trabajo

Referencia film	Condiciones de estirado en frío a 23 °C		Condiciones de estirado en caliente a 140 °C	
	Velocidad (mm/min)	% de estirado	Velocidad (mm/min)	% de estirado
23	0.3	20	0.3	127
23	0.3	20	0.3	292
23	0.3	35	0.3	330
23	1.0	35	1.0	320
23	50.0	35	0.3	320

5.2 Caracterización del comportamiento mecánico

Esta sección se divide en tres partes claramente diferenciadas, en la primera de ellas se realiza la preparación de las probetas, mientras que en la segunda se describe el montaje del ensayo junto con los parámetros y maquinaria utilizados en el mismo, así como la norma que se ha seguido en cada uno de los ensayos y la descripción del proceso. Se realizará de esta misma manera tanto para el ensayo a tracción como para el ensayo para determinar la resistencia al rasgado, que son dos de las propiedades más importantes a la hora de caracterizar mecánicamente el material a estudiar.

5.2.1 Preparación de las probetas

Una vez obtenido el film a partir del proceso de estirado en frío y en caliente se realizarán dos ensayos distintos y que por tanto conllevarán la elaboración de dos probetas con geometría diferente.

1. Probetas para el ensayo a tracción

En este caso se seguirá la norma UNE-EN ISO 527 que es genérica para plásticos en la determinación de las propiedades en tracción, concretamente en este apartado se trabajará con la UNE-EN ISO 527-3, que hace referencia a las condiciones de ensayos para películas y hojas, como es el caso de nuestro film. En este caso se utilizará la probeta tipo 5, mostrada en la figura 21:

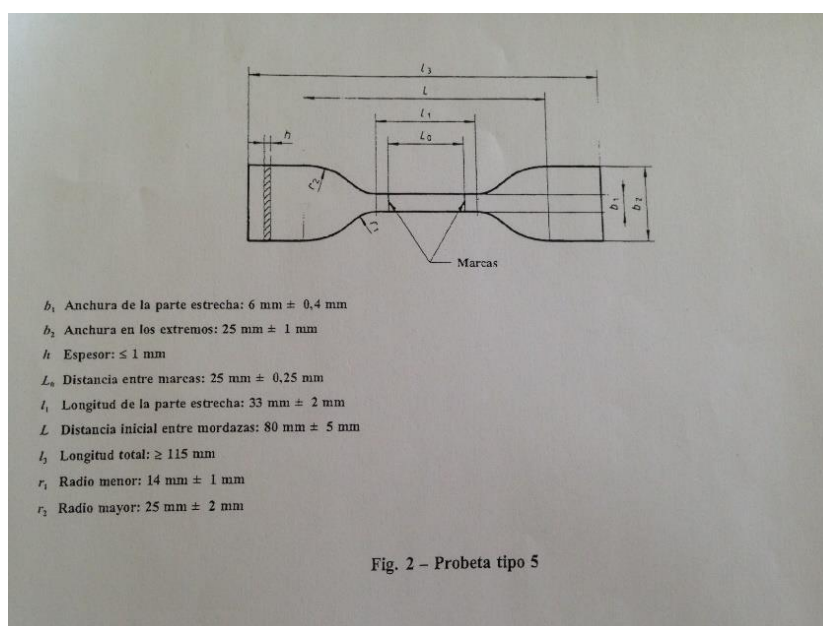


Figura 21. Probeta tipo 5 para ensayo a tracción, extraída de la norma ISO 527-3

Se han elaborado catorce probetas del tipo 5, siete en la dirección de elaboración del film, marcadas como MD (dirección de máquina) y el número de probeta; y posteriormente siete más con la marca TD (dirección transversal) también con el número de probeta en concreto. Es importante relacionar cada probeta con una dirección y un número ya que más tarde se tendrán que extraer resultados experimentales y conclusiones de las mismas

Estas probetas del tipo 5 se han llevado a cabo mediante una troqueladora, ésta se encarga de perforar el film y obtener la geometría deseada mediante una cuchilla afilada, que aparece representada en la figura 22.



Figura 22. Cuchilla de la troqueladora para obtener la geometría de la probeta tipo 5

2. Probetas para el ensayo de determinación de la resistencia al rasgado

En este proceso se seguirá la norma UNE-EN ISO 6383-1, que trata sobre plásticos concretamente sobre películas y láminas de plástico en la determinación de la resistencia al rasgado mediante el método de la probeta pantalón. Esta sección se centra en la elaboración de la probeta, que como se puede observar en la siguiente figura, tiene una forma rectangular, con un corte central hasta la mitad para la correcta realización del ensayo (las medidas están expresadas en milímetros):

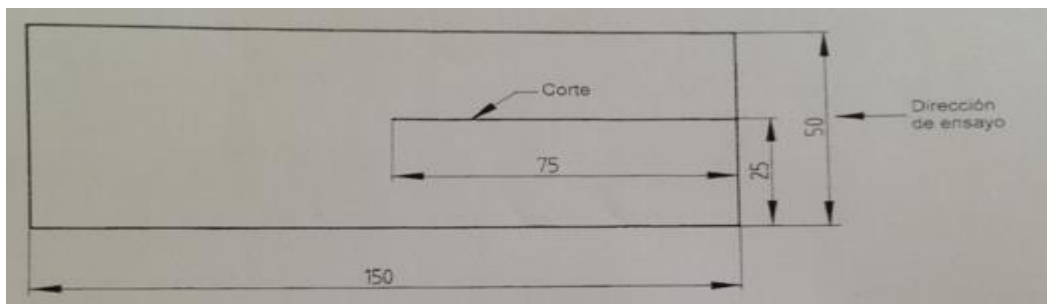


Figura 23. Probeta tipo para determinación de la resistencia al rasgado, extraída de la norma ISO 6383-1

En este caso la elaboración de las probetas ha resultado mucho más sencilla ya que simplemente se ha recortado la forma rectangular perfilando la geometría sobre el film y posteriormente se ha realizado el corte hasta la mitad de la probeta. Se ha seguido la misma nomenclatura que en el ensayo a tracción, en este caso se han llevado a cabo tres probetas en la dirección de la máquina y otras tres en la dirección transversal.

5.2.2 Procedimiento de los ensayos

Como ya se ha comentado, se han realizado dos tipos de ensayos de cara a obtener las propiedades mecánicas del polipropileno utilizado, a continuación se describe el procedimiento seguido en cada uno de estos ensayos:

➤ 1. Ensayo de tracción

En primer lugar hay que destacar que este ensayo se ha realizado en una máquina de ensayos universales, concretamente en la Galdabini modelo Sun 2500. Cabe remarcar que la norma especificaba que la célula de carga no había de ser superior a 100 N pero en nuestro caso solo disponíamos de una de 5 kN por lo que se perderá algo de sensibilidad en los resultados, aunque aun así seguirán siendo perfectamente válidos. De cara a comentar el desarrollo del procedimiento es útil utilizar la siguiente figura:



Figura 24. Colocación de la probeta en el ensayo a tracción llevado a cabo en la máquina de ensayos universales Galdabini Sun 2500

Como se puede observar en la figura 24, la probeta se sujeta de sus extremos más anchos a partir de las mordazas de tracción de film y a partir de aquí se aplica una velocidad que hace trabajar la probeta a tracción, esta deformación se registra en la máquina como carrera del cabezal. Cabe destacar que se ha limitado esta carrera del cabezal hasta alrededor de 50mm, como ya se comentará en la discusión de resultados posteriormente. Los parámetros que se han fijado según la normativa aparecen recogidos en la siguiente tabla resumen:

Tabla 5. Principales parámetros fijados en el ensayo a tracción

Ensayo a tracción- Galdabini Sun 2500	
Velocidad	5 mm/min
Célula de carga	5 kN
Temperatura	23 °C

Cabe resaltar que el proceso se realiza a una velocidad constante, de manera que la fuerza va variando su valor para siempre mantener la velocidad igual a 5 mm/min.

➤ 2. Ensayo para determinar la resistencia al rasgado

Este ensayo también se ha llevado a cabo en la máquina de ensayos universales Galdabini Sun 2500, en este caso se ha analizado la resistencia al rasgado mediante la norma UNE-EN ISO 6383-1 usando el método de la probeta pantalón. La colocación de la probeta se muestra en la siguiente figura:

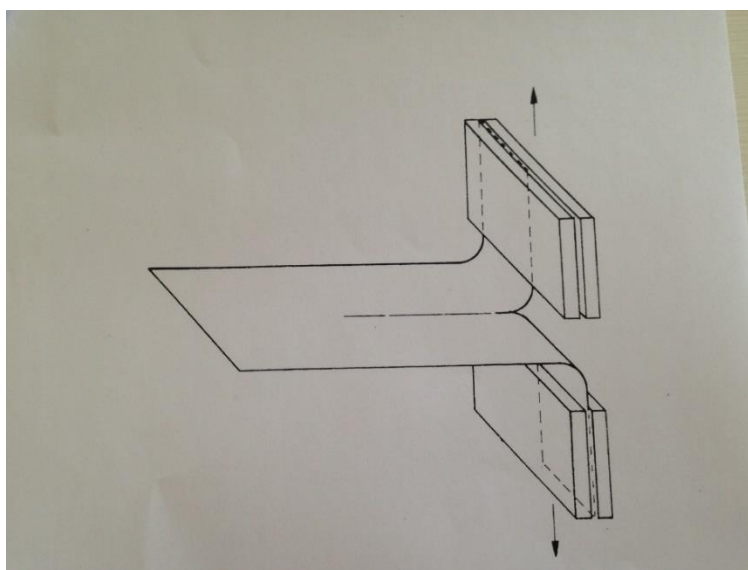


Figura 25. Colocación de la probeta en la determinación de la resistencia al rasgado, extraído de la norma ISO 6383-1

En este ensayo cada una de las partes del corte se sujeta mediante las mordazas de film y se aplica una velocidad de separación para evaluar esta resistencia al rasgado, de manera que el corte avanza a través de la probeta y se evalúa como el material resiste este tipo de rasgado. En este caso la velocidad se fija a 200 mm/min, variando la fuerza para mantener el valor de velocidad constante. De la misma forma que anteriormente, los parámetros básicos de funcionamiento de la maquinaria se recogen a continuación:

Tabla 6. Principales parámetros fijados en el ensayo para determinar la resistencia al rasgado

Ensayo a tracción- Galdabini Sun 2500	
Velocidad	200 mm/min
Célula de carga	5 kN
Temperatura	23 °C

5.2.3 Presentación de resultados

En primer lugar se presentan los resultados obtenidos a partir del ensayo a tracción, cabe destacar que se analizarán los resultados de cada una de las cinco probetas sobre las que se realizó este ensayo.

❖ 1. Ensayo de tracción

Como proceso general cabe destacar que a partir del ensayo realizado, la máquina de ensayos universales extrae una serie de puntos que representan la fuerza que registra la célula de carga, medida en newtons, frente al incremento de la longitud de la probeta, medido en milímetros. A partir de estos resultados y de cara a obtener la gráfica de esfuerzo frente a deformación, se debe realizar un proceso sistemático que consiste en calcular el área de la parte traccionada, que no es más que la anchura de la probeta, que es de seis milímetros y aparece recogida en la figura 21 haciendo referencia a la norma, por el espesor de la probeta, que en este caso varía en cada una de ellas. Por tanto, es necesario calcular cada una de estas áreas, que aparecen descritas en la siguiente tabla:

Tabla 7. Cálculo del área de las probetas sometidas a tracción

Número de probeta	Espesor [mm]	Anchura [mm]	Área [mm ²]
1	0.021	6	0.126
2	0.021	6	0.126
3	0.022	6	0.132
4	0.022	6	0.132
5	0.020	6	0.120

Una vez se han calculado los valores de las áreas, solo hay que dividir la fuerza registrada entre el área para obtener el esfuerzo, representado por σ y que al dividir newton entre milímetro cuadrado, tendrá unidades de megapascal. Por otro lado el incremento de longitud, se dividirá entre la longitud $L_0 = 25mm$ para obtener la deformación ε , que por lo tanto es adimensional. Finalmente, una vez realizado estos pasos se obtendrá el esfuerzo frente a la deformación, gráfica que nos servirá para extraer el módulo de Young, que coincide con la pendiente de la parte lineal, zona elástica del material, o bien como nos indica la norma:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$

Donde

σ_2 es el esfuerzo en el punto $\varepsilon_2 = 0,0025$

σ_1 es el esfuerzo en el punto $\varepsilon_1 = 0,0005$

En muchos de los casos se descarta la metodología de la norma ya que en algunos de estos puntos la medida de esfuerzo es nula y no concuerda con la zona lineal, por lo que los resultados obtenidos siguiendo este método no son representativos, por tanto se utilizará una línea de tendencia para calcular el módulo de Young.

Otro parámetro de interés es la tensión a fluencia o cedencia que se calculará mediante dos metodologías, la primera de ellas es observar el punto donde se pierde la linealidad de la curva y por tanto se identifica como el punto de transición entre la zona elástica y la zona plástica. Por otro lado, el segundo método consiste en trazar una paralela a la zona elástica lineal desde el punto $\varepsilon = 0,002$ de manera que la intersección con la curva indica la tensión de fluencia que se busca.

A su vez, como ya se ha comentado anteriormente, las probetas en la dirección de la máquina no llegaron a romper, aproximadamente se detuvo el ensayo alrededor de los 50 mm de carrera del cabezal, por lo que los valores de tensión y deformación máxima solo se podrá destacar que son mayores que el valor máximo obtenido en la curva, ya que se podría haber prolongado el ensayo hasta la rotura de las probetas y se hubieran registrado un valor mayor de tensión y deformación.

Por último, a modo de resumen, se compararán los resultados para ver las principales diferencias entre el comportamiento frente a la tracción de las probetas en la dirección máquina y las transversales a la dirección de avance de la extrusora.

Una vez comentados los pasos a seguir, primeramente se analizarán los resultados de las probetas en la dirección de la máquina.

- Probeta MD1

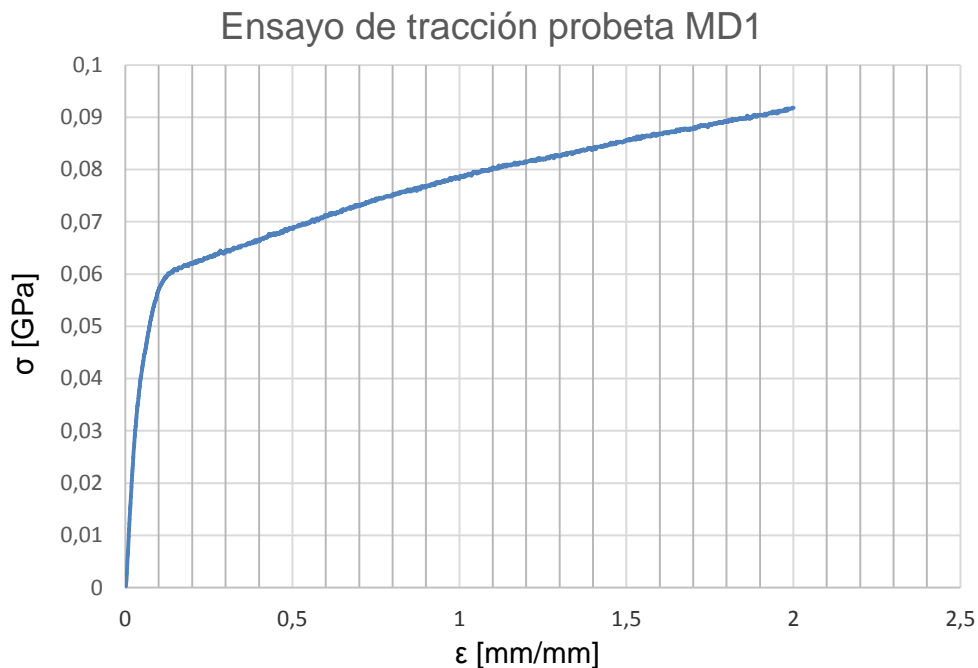


Figura 26. Gráfica esfuerzo frente a deformación de la probeta MD1 extraída del ensayo de tracción

De la figura 26, se calculan la tensión a fluencia, la tensión máxima y la deformación máxima alcanzada; y a partir de la figura 27 se puede calcular el módulo de Young ajustando una línea de tendencia ya que el módulo coincide con la pendiente del tramo inicial elástico ya que el coeficiente de correlación R^2 es prácticamente uno, todos estos valores aparecen recogidos en la tabla 8.

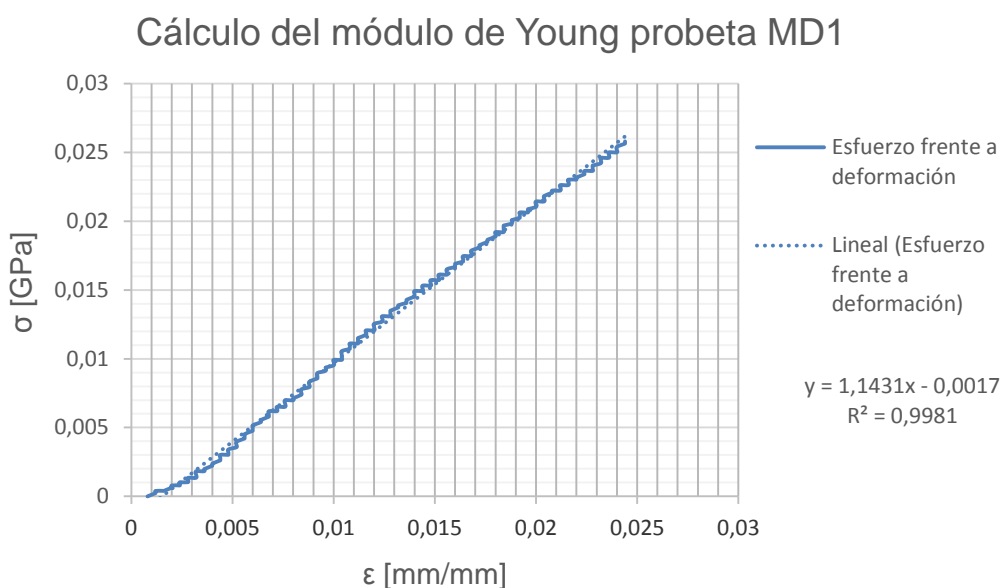


Figura 27. Gráfica de la zona lineal de la curva esfuerzo frente a deformación de la probeta MD1 para el cálculo del módulo de Young

Tabla 8. Parámetros extraídos del ensayo de tracción de la probeta MD1

Característica	Valor
Resistencia a fluencia (σ_y)	40 MPa
Tensión máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$)	>92 MPa
Deformación máxima ($\varepsilon_{m\acute{a}x}$)	>2
Módulo de Young (E_{MD1})	1,14 GPa

▪ Probeta MD2

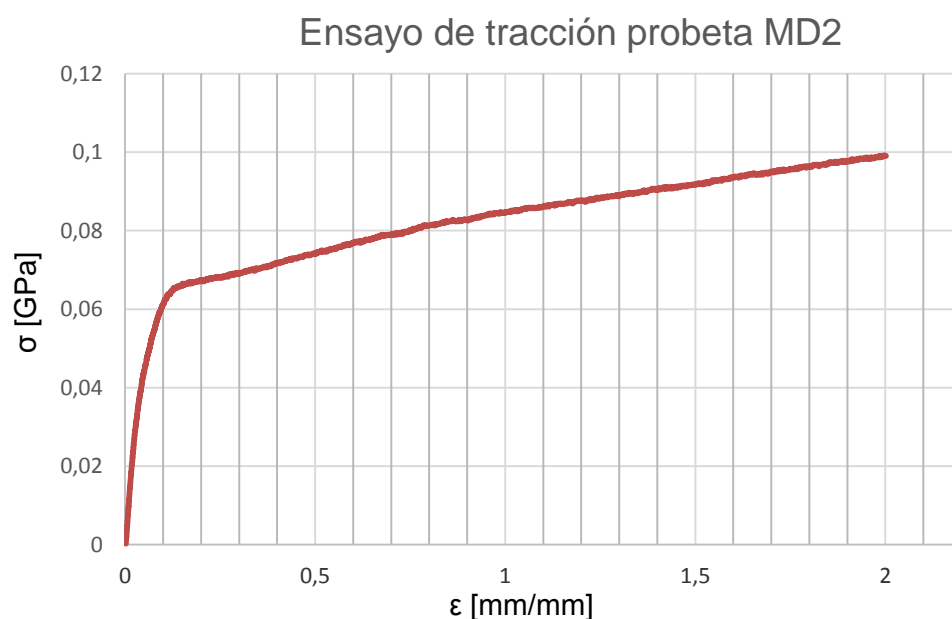


Figura 28. Gráfica esfuerzo frente a deformación de la probeta MD2 extraída del ensayo de tracción

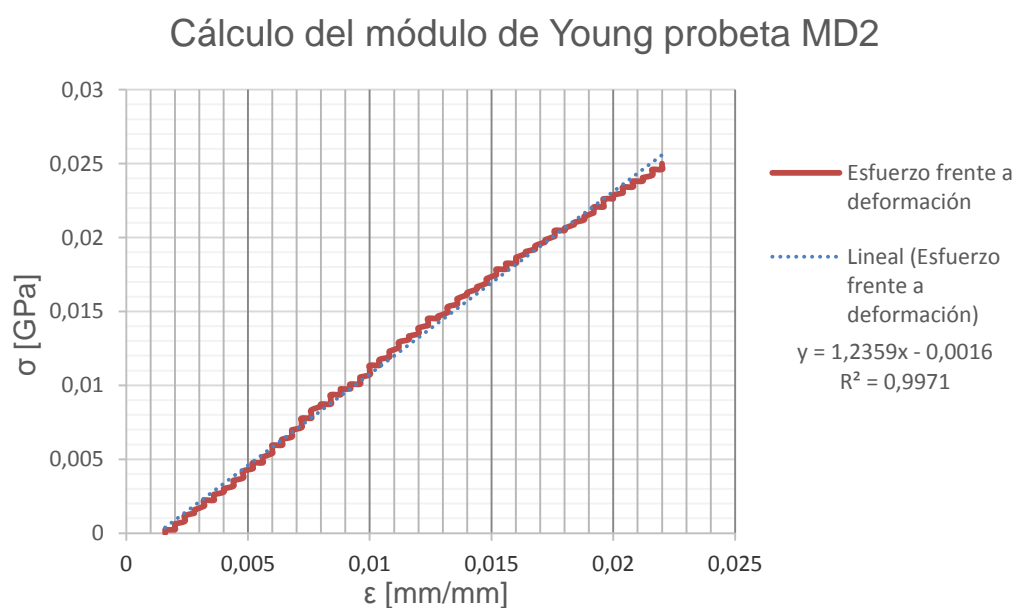


Figura 29. Gráfica de la zona lineal de la curva esfuerzo frente a deformación de la probeta MD2 para el cálculo del módulo de Young

Tabla 9. Parámetros extraídos del ensayo de tracción de la probeta MD2

Característica	Valor
Resistencia a fluencia (σ_y)	36 MPa
Tensión máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$)	>99 MPa
Deformación máxima ($\epsilon_{m\acute{a}x}$)	>2
Módulo de Young (E_{MD2})	1,24 GPa

▪ Probeta MD3

Ensayo de tracción probeta MD3

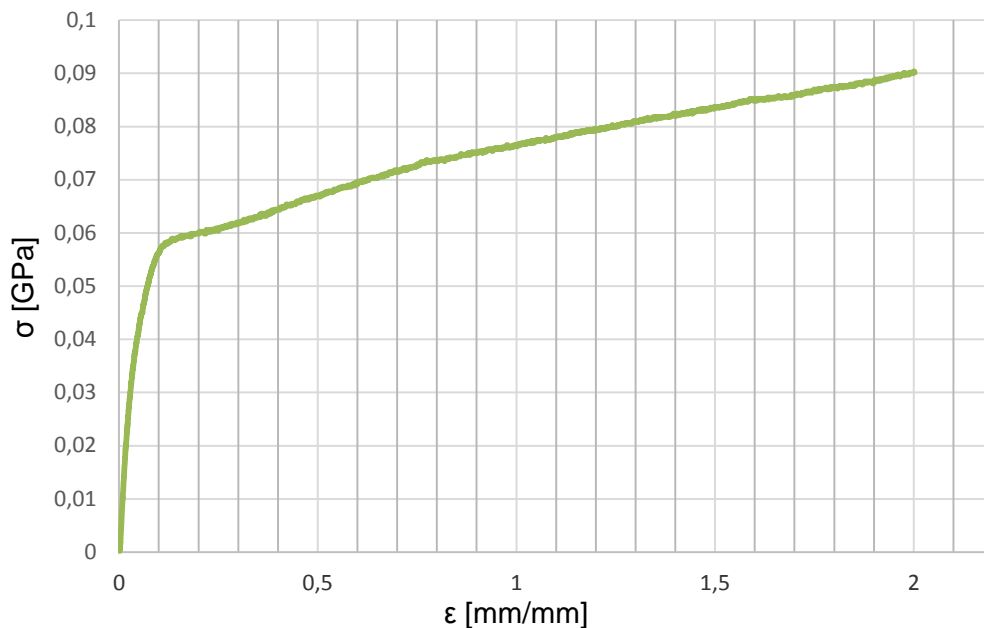


Figura 30. Gráfica esfuerzo frente a deformación de la probeta MD3 extraída del ensayo de tracción

Cálculo del módulo de Young probeta MD3

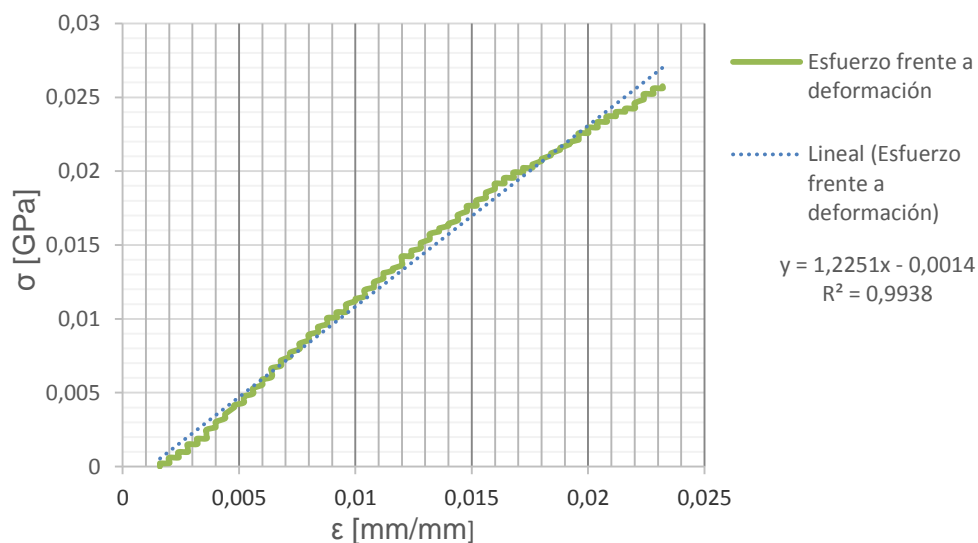


Figura 31. Gráfica de la zona lineal de la curva esfuerzo frente a deformación de la probeta MD3 para el cálculo del módulo de Young

Tabla 10. Parámetros extraídos del ensayo de tracción de la probeta MD3

Característica	Valor
Resistencia a fluencia (σ_y)	37 MPa
Tensión máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$)	>90 MPa
Deformación máxima ($\varepsilon_{m\acute{a}x}$)	>2
Módulo de Young (E_{MD3})	1,23 GPa

▪ Probeta MD4

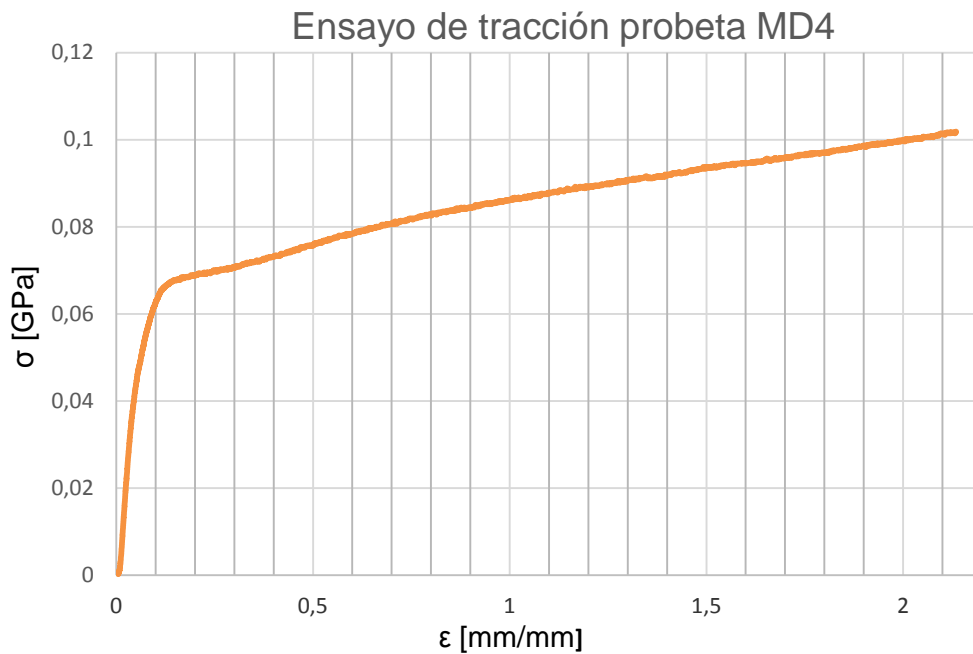


Figura 32. Gráfica esfuerzo frente a deformación de la probeta MD4 extraída del ensayo de tracción

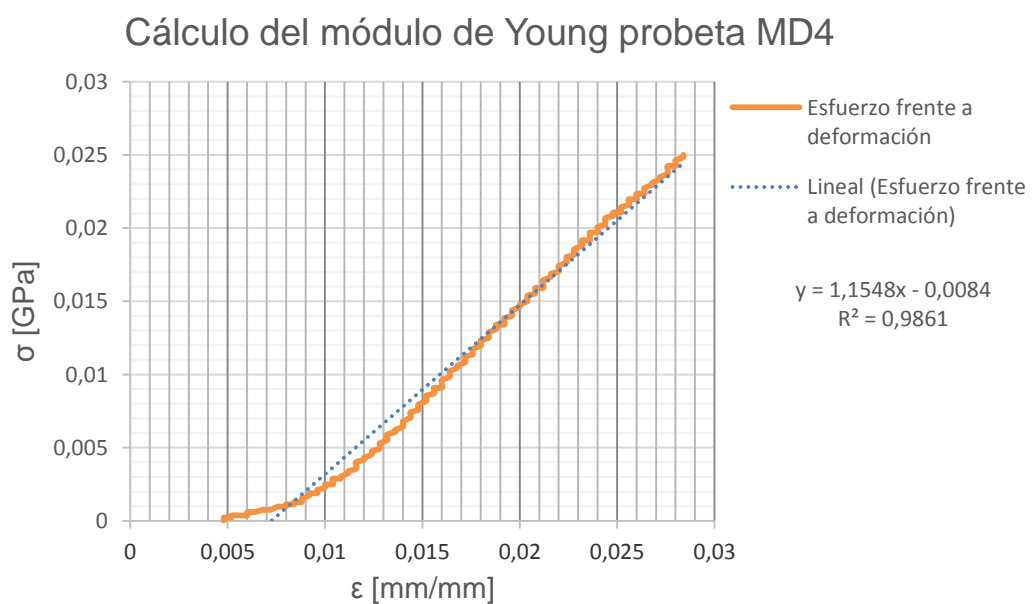


Figura 33. Gráfica de la zona lineal de la curva esfuerzo frente a deformación de la probeta MD4 para el cálculo del módulo de Young

Tabla 11. Parámetros extraídos del ensayo de tracción de la probeta MD4

Característica	Valor
Resistencia a fluencia (σ_y)	45 MPa
Tensión máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$)	>102 MPa
Deformación máxima ($\varepsilon_{m\acute{a}x}$)	>2,13
Módulo de Young (E_{MD4})	1,16 GPa

▪ Probeta MD5 y comparativa

En este caso al ser un cálculo idéntico a los anteriores se expone la siguiente tabla resumen de la probeta MD5 (para más detalles ir al documento Anexos):

Tabla 12. Parámetros extraídos del ensayo de tracción de la probeta MD5

Característica	Valor
Resistencia a fluencia (σ_y)	38 MPa
Tensión máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$)	>93 MPa
Deformación máxima ($\varepsilon_{m\acute{a}x}$)	>2
Módulo de Young (E_{MD5})	1,32 GPa

A modo de comparación se ilustrará una figura que recoja los cinco ensayos en la dirección MD para poder compararlos entre ellos:

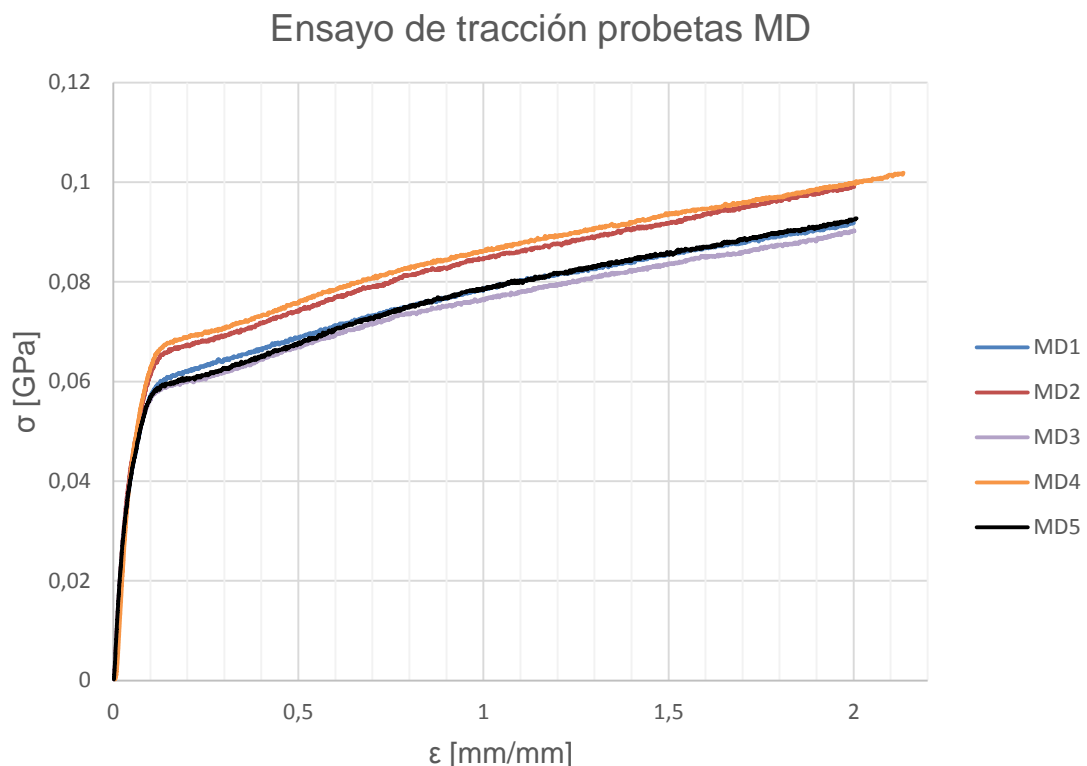


Figura 34. Gráfica esfuerzo frente a deformación de las probetas MD extraídas del ensayo de tracción

En cuanto a la comparativa de la figura 34 cabe destacar que la parte elástica lineal inicial es muy similar en todas las probetas, quizás la MD5 tiene una mayor pendiente, aunque los resultados en el módulo de Young muestran una pequeña variabilidad fruto del proceso de extrusión y del posterior proceso de estirado. Después se puede observar que todas las probetas sufren un proceso de endurecimiento por deformación en el que al aumentar la densidad de dislocaciones del material, se llega a un punto de saturación que impide la formación de nuevas y su movimiento, este proceso corresponde a la segunda zona lineal que debido a que se detuvo el proceso finaliza alrededor de los 50 mm de carrera del cabezal, correspondiente a $\varepsilon \approx 2$.

También cabe remarcar que las probetas MD2 Y MD4 adquirirían una mayor tensión máxima respecto al resto pero aun así no hay una gran variabilidad más allá que la producida por el proceso de obtención del film o de la posterior preparación de las probetas.

A continuación y para finalizar con las probetas en la dirección MD se resumen las propiedades promedio de estas probetas:

Tabla 13. Parámetros promediados extraídos del ensayo de tracción de las probetas MD

Característica	Valor medio
Resistencia a fluencia ($\overline{\sigma_y}$)	39,2 MPa
Tensión máxima ($\overline{\sigma_{m\acute{a}x}}$)	>95,2 MPa
Deformación máxima ($\overline{\varepsilon_{m\acute{a}x}}$)	>2,03
Módulo de Young ($\overline{E_{MD}}$)	1,22 GPa

En segundo lugar, se hará el mismo análisis para las probetas en la dirección transversal, TD. En este caso se llevaron a cabo 7 ensayos ya que alguno de ellos no fue válido. Respecto a los parámetros a estimar, se llevarán a cabo los mismos cálculos con la diferencia de que en este caso se podrán calcular todos los parámetros ya que se pudo llevar a cabo el ensayo hasta la rotura de las mismas.

En la dirección transversal se trabajará de la misma manera que en la MD, primero se expondrá la curva tensión frente deformación, posteriormente la zona lineal de cara a calcular el módulo de Young y finalmente se realizará una tabla resumen con las propiedades de cada probeta. Por último se realizará una comparación entre todas las probetas TD para analizar su variabilidad en función de los resultados.

Como conclusión, se expondrá un último apartado para mostrar las principales diferencias entre las direcciones MD y TD en el ensayo de tracción y a que son debidas esas disparidades, si es que las hubiera.

▪ Probeta TD1

Ensayo de tracción probeta TD1

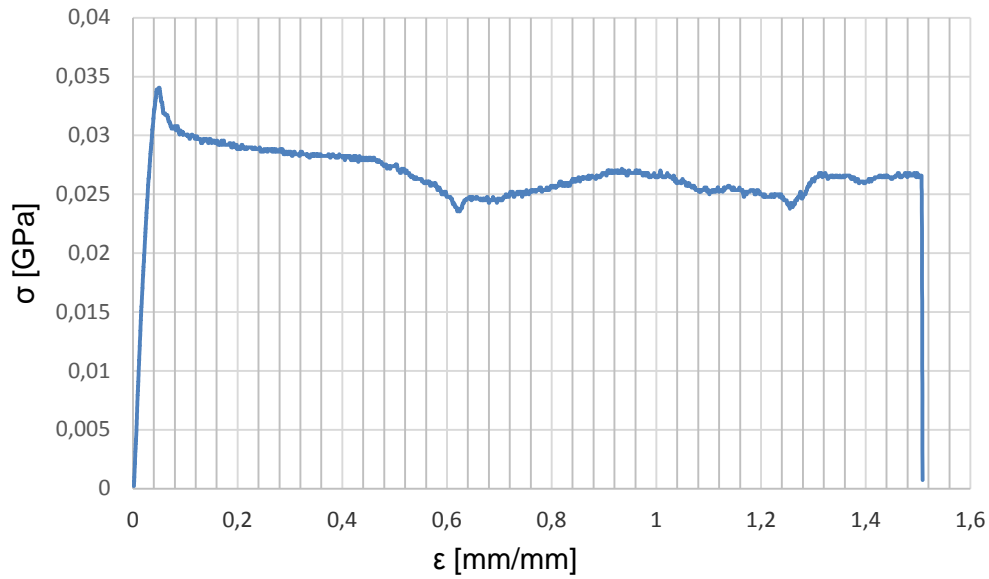


Figura 35. Gráfica esfuerzo frente a deformación de la probeta TD1 extraída del ensayo de tracción

Cálculo del módulo de Young probeta TD1

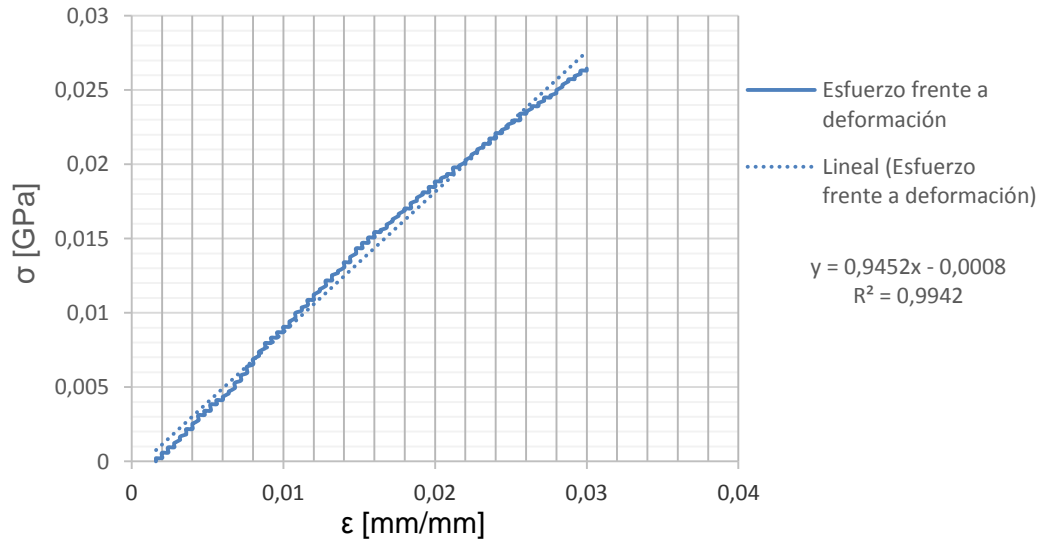


Figura 36. Gráfica de la zona lineal de la curva esfuerzo frente a deformación de la probeta TD1 para el cálculo del módulo de Young

Tabla 14. Parámetros extraídos del ensayo de tracción de la probeta TD1

Característica	Valor
Resistencia a fluencia (σ_y)	32 MPa
Tensión máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$)	34 MPa
Deformación máxima ($\varepsilon_{m\acute{a}x}$)	1,52
Módulo de Young (E_{TD1})	0,95 GPa

▪ Probeta TD2

La probeta TD2 rompió en las mordazas por lo que se considera un ensayo no válido, la figura 37 muestra la rotura repentina.

Ensayo de tracción probeta TD2 (no válido)

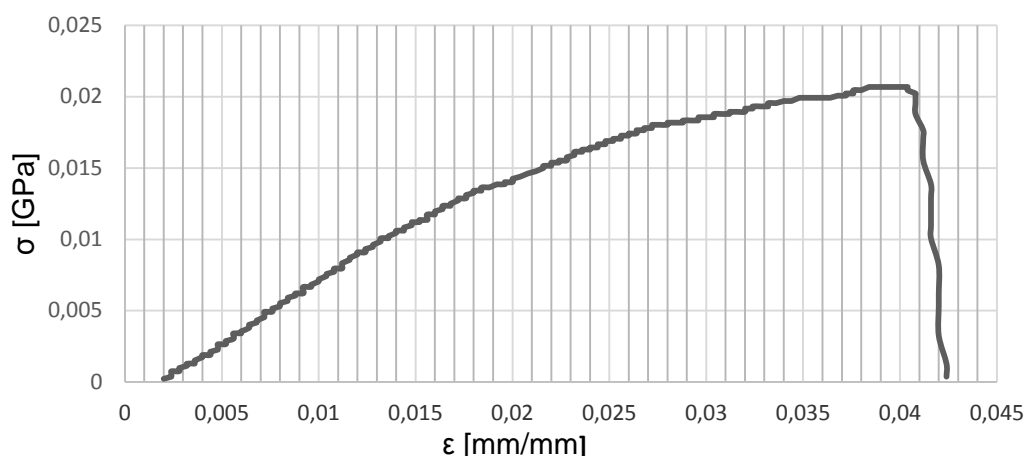


Figura 37. Gráfica esfuerzo frente a deformación de la probeta TD2 correspondiente a un ensayo no válido, extraída del ensayo de tracción

▪ Probeta TD3

Ensayo de tracción probeta TD3

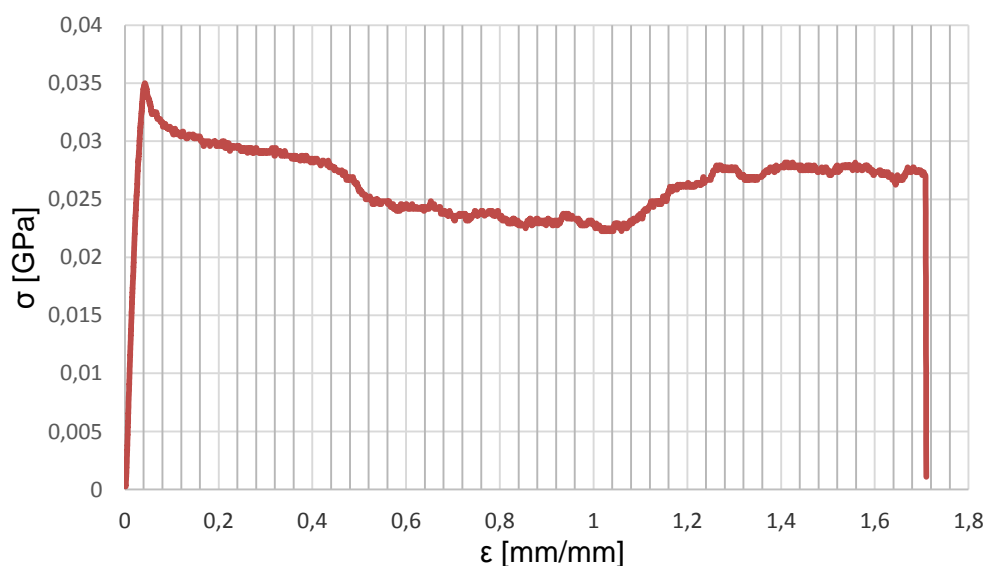


Figura 38. Gráfica esfuerzo frente a deformación de la probeta TD3 extraída del ensayo de tracción

Cálculo del módulo de Young probeta TD3

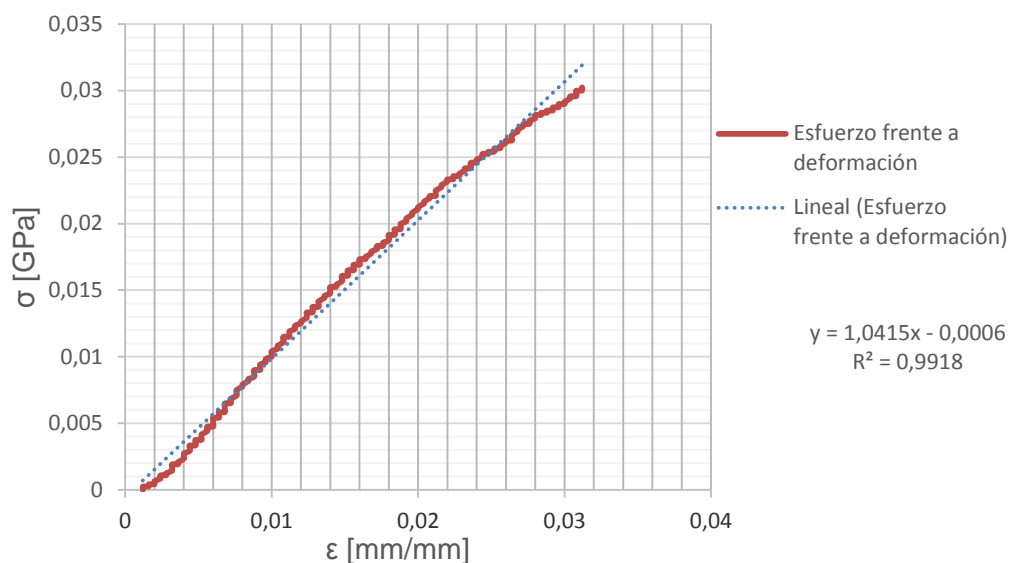


Figura 39. Gráfica de la zona lineal de la curva esfuerzo frente a deformación de la probeta TD3 para el cálculo del módulo de Young

Tabla 15. Parámetros extraídos del ensayo de tracción de la probeta TD3

Característica	Valor
Resistencia a fluencia (σ_y)	34 MPa
Tensión máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$)	35 MPa
Deformación máxima ($\varepsilon_{m\acute{a}x}$)	1,72
Módulo de Young (E_{TD3})	1,04 GPa

▪ Probeta TD4

Ensayo de tracción probeta TD4

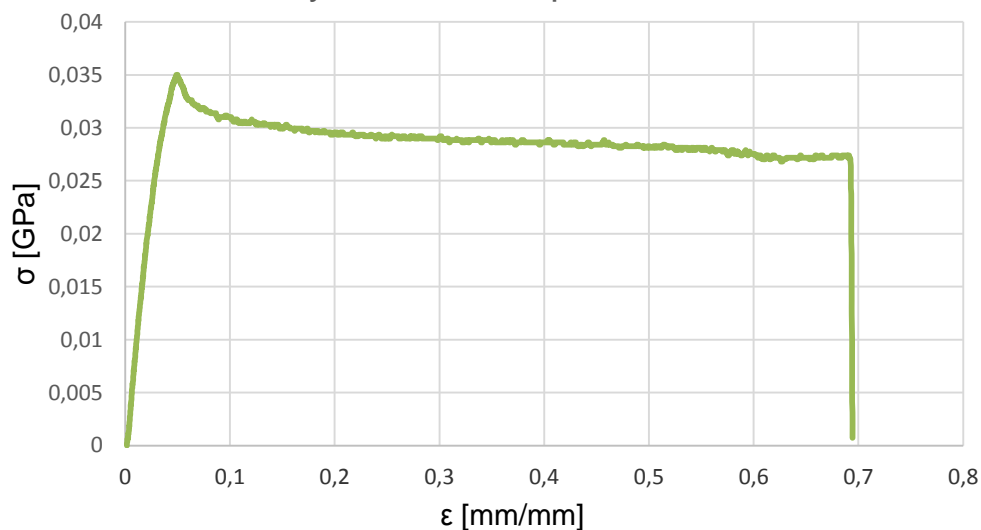


Figura 40. Gráfica esfuerzo frente a deformación de la probeta TD4 extraída del ensayo de tracción

Cálculo del módulo de Young probeta TD4

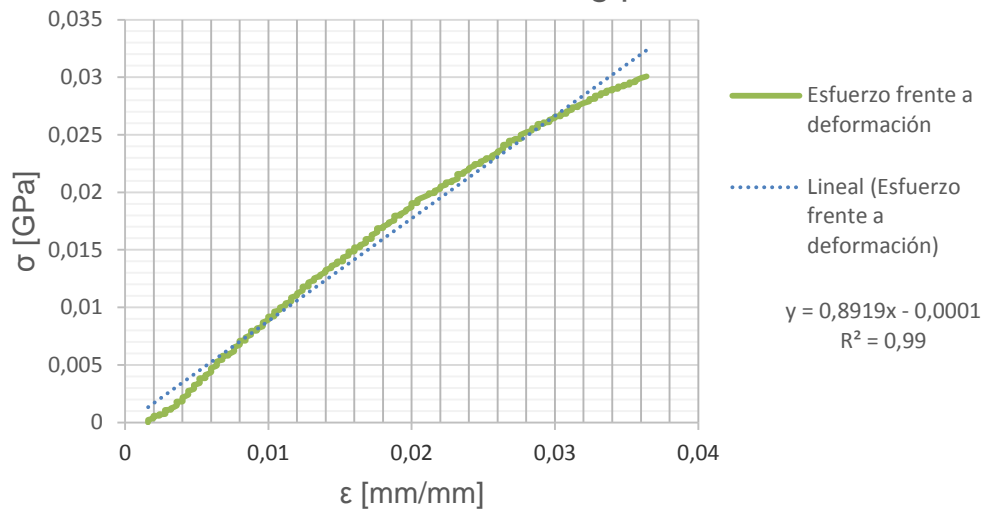


Figura 41. Gráfica de la zona lineal de la curva esfuerzo frente a deformación de la probeta TD4 para el cálculo del módulo de Young

Tabla 16. Parámetros extraídos del ensayo de tracción de la probeta TD4

Característica	Valor
Resistencia a fluencia (σ_y)	35 MPa
Tensión máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$)	35 MPa
Deformación máxima ($\varepsilon_{m\acute{a}x}$)	0,71
Módulo de Young (E_{TD4})	0,89 GPa

- Probeta TD5, TD6, TD7 y comparativa

Debido a que los perfiles de las curvas se repiten, en la siguiente tabla se resume los parámetros estimados de las probetas TD5, TD6 y TD7 (para más detalles ir al documento Anexos).

Tabla 17. Parámetros extraídos del ensayo de tracción de las probetas TD5, TD6 y TD7

Número probeta	Resistencia a fluencia (σ_y)	Tensión máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$)	Deformación máxima ($\varepsilon_{m\acute{a}x}$)	Módulo de Young (E)
TD5	36 MPa	39 MPa	0,25	0,89 GPa
TD6	30 MPa	32 MPa	0,31	0,93 GPa
TD7	35 MPa	42 MPa	1,04	1,04 GPa

De cara a realizar una comparación entre las probetas TD, en la figura 42 se adjunta la gráfica tensión frente a deformación de las diferentes muestras, exceptuando la TD2 ya que fue un ensayo no válido. Si se analiza en detalle la gráfica se puede observar que existe un comportamiento muy diferente entre las diferentes probetas, aunque el perfil de la curva presenta la misma forma.

Esto es debido a que se trata de un material amorfo con sus moléculas totalmente desordenadas y que se encuentra por encima de su temperatura de transición vítrea (T_g), lo que cual permite que estas se desenreden durante el ensayo de tracción formando una líneas perpendiculares a la dirección de sollicitud, que hacen que finalmente dos partes de la probeta queden unidas por un pequeño hilo, por donde finalmente se produce la rotura. Este efecto no se produce igual en todas las probetas, por lo que explica la gran disparidad en los resultados.

La mayor diferencia entre las probetas se puede encontrar en la máxima deformación que pueden soportar, donde hay una gran variación, que va desde $\varepsilon_{m\acute{a}x} = 0,25$ para la probeta TD5 hasta $\varepsilon_{m\acute{a}x} = 1,72$ para la probeta TD3.

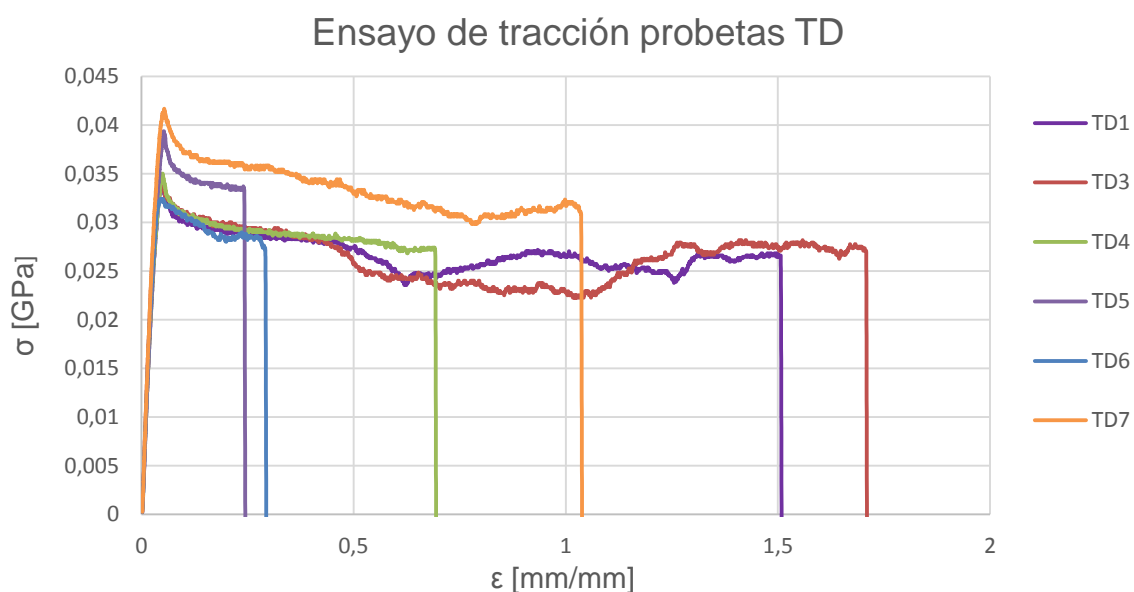


Figura 42. Gráfica esfuerzo frente a deformación de las probetas TD extraídas del ensayo de tracción

Aun así de cara a realizar una comparación con la dirección MD se ha llevado a cabo una media de los valores estimados, la cual se recoge en la siguiente tabla:

Tabla 18. Parámetros promediados extraídos del ensayo de tracción de las probetas TD

Característica	Valor medio
Resistencia a fluencia ($\overline{\sigma_y}$)	33,7 MPa
Tensión máxima ($\overline{\sigma_{m\acute{a}x}}$)	36,2 MPa
Deformación máxima ($\overline{\varepsilon_{m\acute{a}x}}$)	0.93
Módulo de Young ($\overline{E_{TD}}$)	0,96 GPa

Para concluir con los ensayos de tracción se comparará mediante la figura 43, tomada en el laboratorio, las probetas MD y TD de cara a explicar la diferencia en los resultados obtenidos.



Figura 43. Comparación entre probetas MD y TD. Descritas de arriba abajo:
Probeta sin ensayar, probeta MD ensayada y probeta TD ensayada

La diferencia entre los resultados de las probetas es substancial, principalmente en la tensión máxima y en la deformación máxima que son capaces de aguantar, ya que si se continuara el ensayo, los valores de las probetas MD prácticamente triplicarían a los registrados por las TD. Este hecho es debido principalmente a la alta orientación de las muestras en la dirección MD que hacen que estas probetas tengan una zona de endurecimiento por deformación, que se puede identificar en la figura 43 debido al color blanquecino de que muestra, y por tanto pueden seguir aumentando su tensión y deformación máxima. En cambio, las probetas TD forman una zona de líneas perpendiculares, situada a la derecha de la probeta y a su izquierda un cuello que finalmente deja una zona de unión muy débil por donde el material termina fracturando.

Cabe destacar que para esclarecer la deformación a la que se ve sometida la probeta y el color de la misma se ha dispuesto de una probeta que finalmente no se ensayó, situada en la parte superior de la ilustración.

❖ 2. Ensayo para la determinación de la resistencia al rasgado

Los ensayos de rasgado se han realizado mediante el método de la probeta pantalón, explicado anteriormente, en este caso se han realizado sobre dos probetas en la dirección MD Y dos probetas en la dirección TD.

En primer lugar si se analiza el ensayo de las probetas MD se obtiene que la resistencia al rasgado es prácticamente nula, las fuerzas registradas son del valor de 0,03 N que podrían ser menores que el propio error de la máquina. Esto es debido a que el material tiene una alta direccionalidad en el sentido de avance de rasgado por lo que el corte se propaga siguiendo una línea recta por el centro de la probeta sin ningún problema hasta ocasionar su rotura en dos partes.

En la dirección TD es cierto que se registra una cierta fuerza opositora al rasgado pero el perfil de la curva obtenido no se asemeja al que se presenta en la normativa ISO 6383-1, representado en la figura 44, ya que en el caso de las probetas TD la oscilación es muy grande.

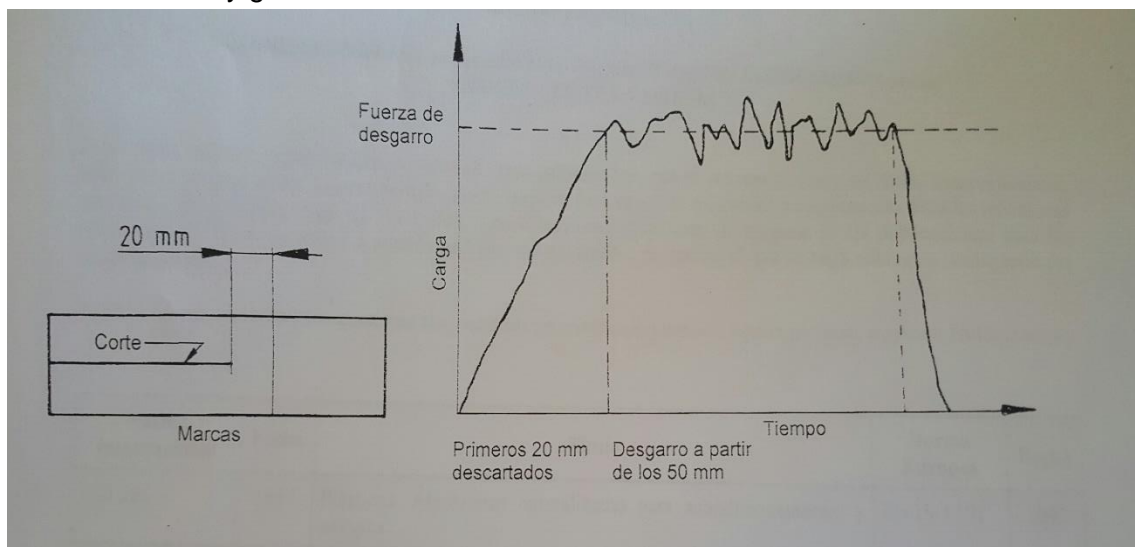


Figura 44. Comparación entre probetas MD y TD. Descritas de arriba abajo:
Probeta sin ensayar, probeta MD ensayada y probeta TD ensayada

En las probetas TD sucede lo contrario que en el ensayo de las probetas MD, el corte no avanzaba por el centro de la pieza sino que avanzaba perpendicularmente rompiendo a la altura donde se había realizado el corte, esto es debido de nuevo a la gran orientación del material que hace que en este caso el corte siga avanzando en la dirección que tiene marcada por el proceso de obtención.

Es por ello que en aplicaciones en contacto con otros materiales habrá que controlar que esta baja resistencia al rasgado del material no acabe ocasionando algún problema en el mismo y que finalmente esto pueda producir el colapso de la estructura al completo.

5.3 Caracterización de la impermeabilidad al paso del agua

En cuanto a la caracterización del material respecto a la impermeabilidad al paso del agua cabe destacar que es la principal característica ya que este se utiliza como barrera contra el fluido.

La técnica usada para determinar la permeabilidad es una modificación del método descrito en la norma ASTM E 96-95. En dicho método se cubre una placa de Petri conteniendo agua destilada con el film a ensayar, registrándose la pérdida de agua en función del tiempo. A partir de dichos datos se obtiene la velocidad de transmisión de agua a partir de la zona de régimen estacionario y la permeabilidad.

El resultado obtenido de la permeabilidad al agua a 27 °C es:

$$Permeabilidad\ al\ agua\ (27\ ^\circ C) = 17 \cdot 10^{-13} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$$

Cabe destacar que este valor se encuentra dentro del rango comentado en la sección 4 en la parte de las geo-membranas por lo que la aplicación de barrera contra el fluido la podrá llevar a cabo de formar satisfactoria.

5.4 Caracterización de las propiedades térmicas

Esta sección se centra en el ensayo del análisis termogravimétrico (TGA) de cara a evaluar las propiedades térmicas del material. Para ello se han realizado el estudio sobre el precursor sólido de la membrana, aquel que ha sido caracterizado mecánicamente a tracción y desgarro.

Primeramente se trata la metodología experimental, tanto el equipo y sus características técnicas como el procedimiento utilizado para llevar a cabo el experimento. En segundo lugar se muestran los resultados obtenidos de cara a su posterior análisis

5.4.1 Procedimiento del ensayo

En primer lugar se debe llevar a cabo una descripción del equipo empleado, para ello se utiliza la siguiente tabla que resume la información:

Tabla 19. Características principales del equipo para el análisis termogravimétrico

Característica	Descripción
Marca y modelo	Mettler Toledo TGA/DSC 1 Star System
Rango de temperaturas	30 a 1200 °C
Velocidad de calentamiento (calentamiento controlado)	5 a 50 °C/min
Rango de masa de la muestra	0,5 a 20 mg
Atmósfera de trabajo	Nitrógeno o aire (a partir de botella)

En el ensayo realizado primero se prepara la muestra cortándola con cúter, la masa de esta muestra es de 9,4426 mg. Posteriormente se coloca sobre un pequeño crisol cerámico. Este crisol junto con la muestra se introduce en el interior del horno y se coloca sobre una micro-balanza y se calienta la muestra a una velocidad controlada.

Al estar la muestra sobre la micro-balanza, se registra la masa de la muestra en todo momento en función de la temperatura, de cara a finalmente registrar la pérdida de masa frente a la temperatura. Las características de este ensayo son las siguientes:

Tabla 20. Características del ensayo de la pérdida de masa en función de la temperatura

Característica	Descripción
Velocidad de calentamiento	10 °C/min
Rango de temperaturas	40 a 1000 °C
Atmósfera de aire	Flujo de aire constante de 60 ml/min

5.4.2 Presentación de resultados

En cuanto al análisis de los resultados obtenidos, se analizarán tres tipos de gráficas. La primera de ellas es la de porcentaje de peso frente a la temperatura, la segunda presenta el flujo de calor frente a la temperatura y la tercera es la primera derivada del porcentaje de pérdida de peso frente a temperatura

A continuación en la figura 45 se presentan las tres gráficas en el orden antes mencionado a partir del equipo utilizado, el cual nos proporciona una serie de datos de interés de cada una de las curvas:

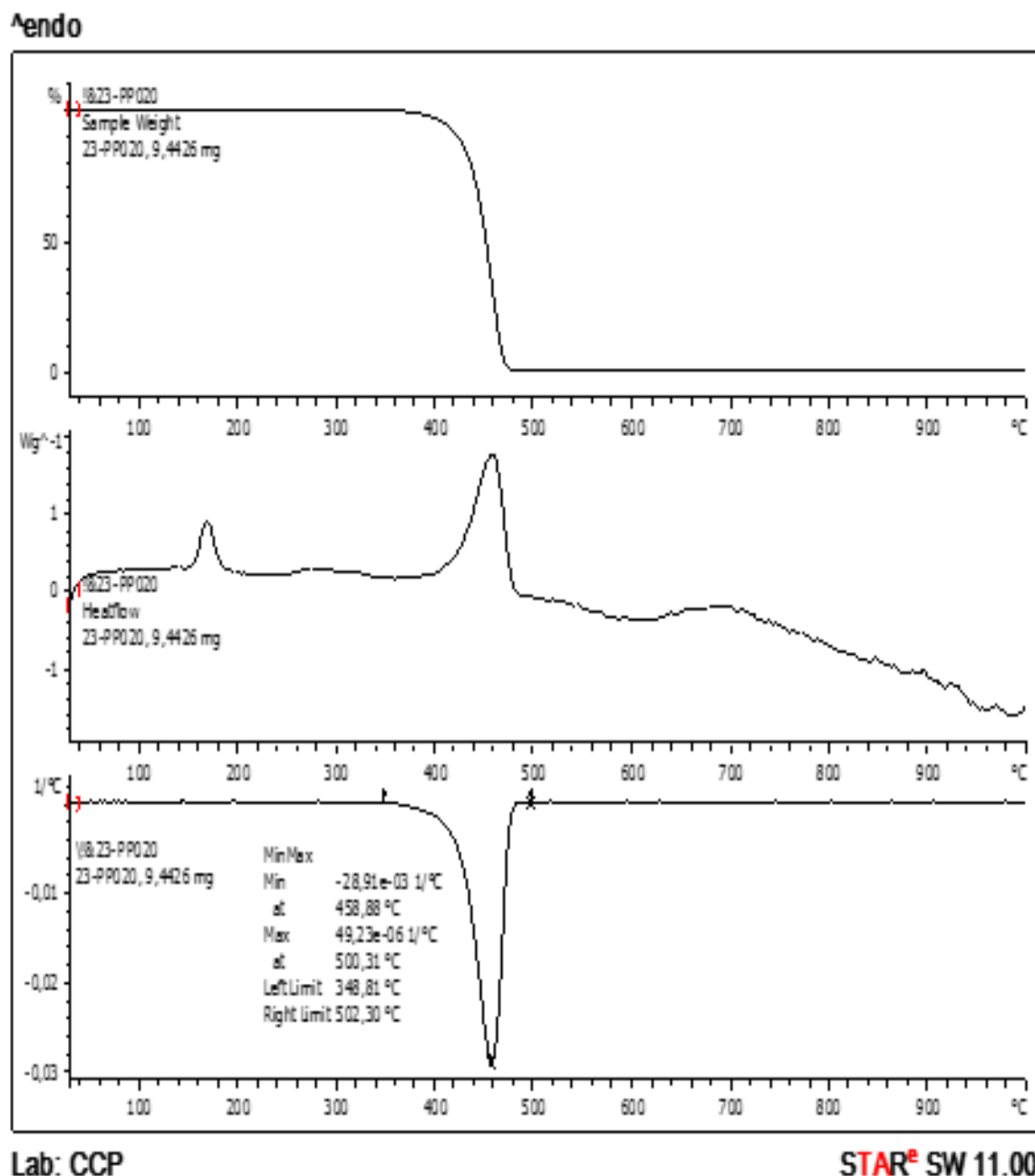


Figura 45. Análisis termogravimétrico. De arriba abajo: (1) Curva de porcentaje de peso frente a temperatura. (2) Flujo de calor frente a temperatura. (3) Primera derivada del porcentaje de pérdida de peso frente a temperatura

A partir de las anteriores gráficas se pueden extraer diferentes datos de interés. En primer lugar tanto en la curva de porcentaje en peso frente a temperatura y la de la primera derivada de la pérdida de porcentaje en peso frente a temperatura se puede extraer la estabilidad térmica del material que coincide con el inicio de la caída. En nuestro caso para hacer esta interpretación más sencilla se han marcado distintos puntos que aparecen reflejados en la siguiente figura:

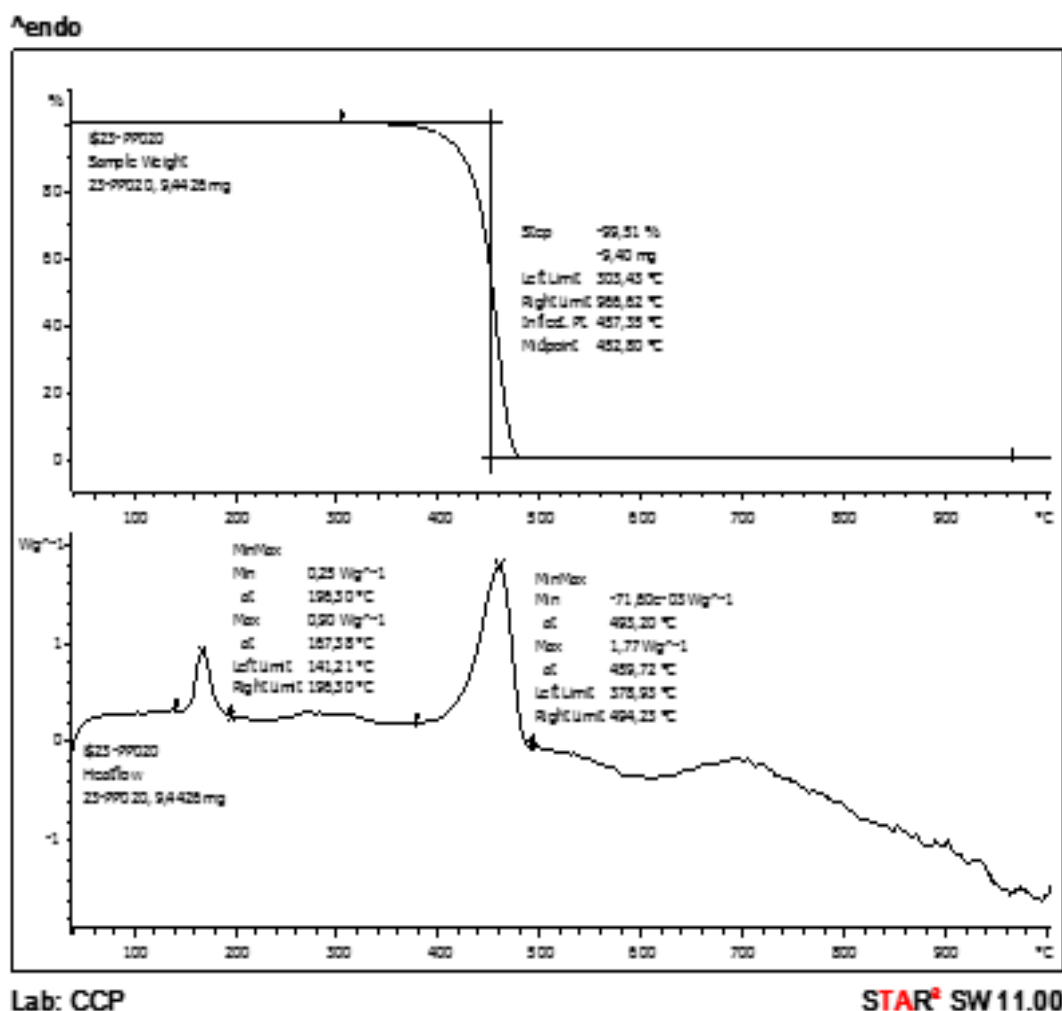


Figura 46. Análisis termogravimétrico destacando algunos puntos de interés. De arriba abajo: (1) Curva de porcentaje de peso frente a temperatura. (2) Flujo de calor frente a temperatura

Se puede extraer de las curvas que entre los $303,4^{\circ}\text{C}$ y los 490°C se ha producido una pérdida del 99,5% del material, por lo que se identifica el inicio de la caída alrededor de los 400°C y por tanto valor que corresponde con la estabilidad térmica del material en atmósfera en presencia de oxígeno.

Este valor se puede extraer de la primera gráfica observando cuando empieza la caída o bien observando cuando empieza a crecer la derivada del porcentaje en peso, que alcanza su máximo en $459,7^{\circ}\text{C}$.

Por otro lado también es interesante obtener a partir de la curva de flujo de calor en función de la temperatura como en el momento donde la caída en porcentaje de peso es máxima y por tanto la derivada también es máxima, se produce una absorción de calor asociada al proceso de degradación que se puede observar en el flujo de calor, concretamente a una temperatura de $458,9^{\circ}\text{C}$ que prácticamente coincide con el valor máximo de la curva de la derivada de porcentaje de pérdida de peso antes mencionada.

Por último, de la curva de flujo de calor frente a la temperatura se puede observar como hay un pico al inicio, este pico es la temperatura de fusión del polipropileno ensayado, en este caso:

$$T_{\text{fusión}} = 167^{\circ}\text{C}$$

6. Resumen económico

Esta sección recoge el resumen del documento Presupuesto, en el que aparecen descritos todos los costes de manera mucho más detallada, en este caso se incluye una tabla resumen con cada uno de los costes generales y finalmente el coste final de todo el proyecto, para cualquier duda al respecto de algún valor ir al documento Presupuesto donde consta el desglose de cada uno de los subcostes.

Tabla 21. Tabla resumen del presupuesto

Descripción del coste	Valor [€]
Coste de la materia prima	100
Coste de los procesos de obtención	2580
Coste de los ensayos	1955
Coste del ingeniero	20370
Coste final del proyecto	25005

7. Estudio del impacto medioambiental

Unos de los aspectos más significativos de cualquier proyecto es el impacto medioambiental ya que es uno de los puntos de valoración de la viabilidad de nuestro trabajo. Es por ello que es decisivo realizar un estudio de las actividades realizadas asociadas al consumo de CO_2 .

En nuestro caso este consumo es debido principalmente al uso de los equipos en los ensayos junto con la movilidad asociada a la realización de los mismos.

En primer lugar se presenta el consumo de la maquinaria utilizada en la parte experimental junto con el número de horas de uso de cada equipo y finalmente la conversión a kilogramos de CO_2 .

Equipo	Potencia [kW]	Uso [h]	Consumo [kWh]	Emisión CO_2^* [kg]
Extrusora Calandra	17	6	102	26,93
Circuito de refrigeración NOVAIR MTA TAE 051	7,9	6	47,4	12,51
Máquina de ensayos universales	2,5	5	12,5	3,3
TGA	4	3	12	3,17
Ordenadores	6,2	10	62	16,37
Fluorescentes	0,058	15	0,87	0,23
TOTAL	-	-	236,77	62,54

Tabla 22. Tabla resumen del presupuesto

*Teniendo en cuenta que $1 kWh = 0,264 kg CO_2$

Por otro lado si se tiene en cuenta los kilómetros andados a pie de cara al trayecto entre las instalaciones y las reuniones con el director del proyecto suman alrededor de 30 kilómetros. Por lo que considerando $0,16 MJ/km$ y $1 MJ = 0,022 kg CO_2$ se obtienen un total de $0,11 kg CO_2$.

Finalmente las emisiones totales son de $62,65 kg CO_2$. Es necesario resaltar que las emisiones medias por hectárea y año son de $4,58 Tn CO_2$ por lo que la equivalencia en hectáreas del proyecto sería de 0,014 hectárea o bien $140 m^2$ que resulta ser una superficie bastante pequeña. Para poder tener algún ejemplo tangible serían las emisiones equivalentes a realizar un viaje en coche de unos 950 km, por lo que al tratarse de un proyecto en el que se hace uso de maquinaria con un alto consumo resulta un impacto medioambiental bastante reducido y un punto a destacar del mismo.

8. Consideraciones de seguridad

Uno de los aspectos a tener en cuenta en la elaboración de un proyecto es respetar una serie de consideraciones de seguridad, sobretodo en el caso de la elaboración de ensayos, en los que existen varios peligros que se han de evitar. Es por ello que a continuación se exponen una serie de normas que se han de respetar en el Centro Català del Plàstic, lugar donde se han realizado los ensayos:

❖ Indumentaria

Se ha de llevar siempre una bata que evite que algún posible residuo acabe dañando nuestra piel ya que suele ser una situación bastante normal que en algún ensayo alguna partícula se desprenda. En la misma línea es necesario llevar unas gafas de seguridad para proteger una zona tan delicada como los ojos ya que muchas veces se ha de tener una buena visibilidad del experimento y para ello se tiene que estar muy próximo al mismo. A su vez también es necesario en algunas ocasiones llevar guantes de nylon debido a la naturaleza química del producto que se está tratando y para proteger la piel de las manos, que en algunas personas es muy sensible al contacto de algunos materiales. Por último aquellas personas que tengan el pelo largo habrán de llevarlo recogido de manera que este no pueda entorpecer en algún ensayo y ocasionar desperfectos tantos personales como en el equipo, así como aquellas personas que tengan bufandas o pañuelos largos.

❖ Instalaciones

El centro tiene una serie de normas de seguridad respecto a sus instalaciones que hacen de las mismas un lugar seguro para trabajar. Se dispone de una serie de extintores repartidos por todas las maquinarias de manera que en caso de fuego se puede acceder rápidamente y extinguirlo ocasionando los menos desperfectos posibles. En segundo lugar se cuenta con un sistema de ventilación que permite evacuar de forma eficaz los flujos de gas que se producen en algunos ensayos y que pueden ser nocivos para la salud.

A su vez todos los equipos cuentan con un botón de emergencia ya que en caso de mal funcionamiento del ensayo se puede detener de manera rápida el mismo sin ocasionar ningún daño. Por último, cabe destacar que se cuenta con una serie de botiquines repartidos por las instalaciones de cara a realizar las curas básicas frente a cortes o quemaduras.

❖ Normas de comportamiento

Es de gran importancia comportarse correctamente mientras se está en contacto con los equipos. Para ello se ha de evitar tocar productos o equipos sin el consentimiento del responsable, evitar depositar instrumentos de trabajo o indumentaria personal en las mesas ya que esto puede interrumpir el trabajo y en caso de emergencia interrumpir la rápida evacuación.

También se ha de evitar correr por las instalaciones o andar de un lado a otro ya que puede ser que ocasionemos algún desperfecto. Se ha de resaltar también que la zona se ha de mantener de manera aseada para que aquel que visite posteriormente las instalaciones puede llevar a cabo su labor sin preocuparse de limpiar lo que él no ha ensuciado. Por último, se han de respetar, si constan, los carteles de seguridad específicos del equipo en concreto sobre el que se está trabajando.

Por otro lado, también se han de tener una serie de consideraciones de cara a interpretar un proyecto ya que los resultados tienen que ser evaluados de manera minuciosa porque un error puede costar la vida a un gran número de personas. Es por ello que se exponen una serie de normas a seguir a la hora de realizar un proyecto, algunas de ellas incluidas en la planificación futura:

❖ Espíritu crítico

De cara a evaluar los resultados se ha de tener una iniciativa siempre a dudar en un primer momento del valor obtenido ya que posiblemente las hipótesis no eran correctas o ha habido algún tipo de error de cálculo. Para ello se puede consultar la bibliografía y observar un rango de valores de los resultados habituales o bien acudir a personal que lleva más tiempo trabajando con este tipo de ensayos que quizás te puedan ayudar a corroborar si aquel valor obtenido está dentro del rango posible de actuación.

❖ Elementos finitos (planificación futura)

Este es uno de los puntos clave, en la planificación futura, en cuanto a la seguridad ya que puede resultar un arma de doble filo. En primer lugar se trata de una herramienta de gran utilidad pero a su vez los resultados están sometidos a condiciones de contorno y a hipótesis que hacen variar los resultados de manera substancial. En estos análisis es clave la realización de una doble comprobación junto con la comprobación del programa por expertos en la materia.

❖ Certificación

En la misma línea pero ya de cara a la planificación futura es importante someter a nuestro producto a la certificación de manera de que se compruebe que este es totalmente seguro y por tanto puede ser comercializado sin ningún tipo de problema.

9. Planificación del proyecto

En cuanto a la planificación del proyecto, esta sección se puede dividir en tres partes. La primera de ellas trata sobre la comparación de la planificación del trabajo entre la inicial, realizada para el Project Charter y la planificación definitiva.

En segundo lugar también se estudiará el número de horas que se ha dedicado a cada una de las partes, dato que es necesario para calcular el presupuesto final del proyecto.

Por otro lado, la tercera parte de esta sección está dedicada a las tareas que se tendrían que llevar a cabo en el caso de que se continuará el proyecto en un futuro y la planificación de esta parte.

9.1 Planificación de las tareas

En primer lugar se incluye las tareas que se programaron inicialmente de cara a la elaboración del Project Charter:

Planificación inicial de tareas (Project Charter)

- 1. Investigación bibliográfica y estado del arte sobre pavimentos de aeropuertos
- 2. Redacción del Project Charter
- 3. Planteamiento de los problemas existentes en la actualidad en pavimentos flexibles y posibles soluciones a los mismos
- 4. Selección de los materiales y combinaciones de cara a su uso en pavimentos flexibles de aeropuertos
 - 4.1 Materiales geo-sintéticos
 - 4.2 Materiales alternativos
- 5. Caracterización de los materiales seleccionados
 - 5.1 Caracterización del comportamiento mecánico
 - 5.2 Caracterización de la impermeabilidad al paso del agua
 - 5.3 Otras propiedades
- 6. Interpretación, discusión y presentación de resultados.
- 7. Redacción de la memoria
- 8. Revisión del borrador de la memoria
- 9. Revisión de la memoria
- 10. Preparación de la presentación

Si se realiza una comparación con la lista de tareas actual, especificada en el índice en la página III (exceptuando las tareas de redacción del Project Charter, redacción de la memoria, revisión del borrador de la memoria, revisión de la memoria y preparación de la presentación, dado que todas ellas se realizarán igualmente en la planificación definitiva; ya su vez el presupuesto y el pliego de condiciones que son documentos a parte de la memoria) se puede concluir que solo se han producido una serie de cambios, que son debidos a documentos específicos necesarios para la memoria o bien debido a entrar en detalle en alguna de las secciones:

1. Parte inicial de introducción y sus respectivos apartados, que no se incluyó en la planificación actual ya que realmente ya estaba incluida en la elaboración del Project Charter.
2. En cuanto al apartado 3. Planteamiento de los problemas existentes en la actualidad en pavimentos flexibles y posibles soluciones a los mismos, cabe resaltar que en el proyecto definitivo se han detallado subsecciones que en un primer momento no estaban del todo claras y por ello se dejó sin completar.
3. En el apartado 5 y sus consiguientes subapartados se han variado y añadido algunos puntos pero en realidad la información recogida es la misma, referida a la caracterización mecánica y de impermeabilidad al paso del agua del material. La parte de propiedades térmicas se ha añadido aunque también es cierto que ya se hablaba de ella en los requisitos del Project Charter.
4. La diferencia substancial entre ambas planificaciones reside en la introducción de los apartados de resumen económico, estudio del impacto ambiental, consideraciones de seguridad, planificación del proyecto, conclusiones y recomendaciones y finalmente el de bibliografía y normativa. En un primer momento no se pensó en la introducción de estos apartados debido a que era una etapa muy temprana en la que se centró más atención en el estudio de los pavimentos y los posibles materiales a utilizar.
5. La elaboración del presupuesto y del pliego de condiciones que en primera instancia no fueron contemplados.

De cara a su planificación temporal, sencillamente es necesario comparar ambos diagrama de Gantt, que se incluyen en la siguiente página a modo de resumen. Aun así debido a que la mayoría de apartados se mantienen igual, solo se han añadido las dos semanas que se añadieron al plazo de entrega, que son las que se han utilizado para elaborar el resumen económico, estudio del impacto ambiental, consideraciones de seguridad, planificación del proyecto, conclusiones y recomendaciones, bibliografía y normativa; y finalmente los documentos del pliego de condiciones y el presupuesto.

De todos modos para observar en detalle cada uno de los apartados y plazos cumplidos se adjuntan las tareas temporales definitivas y ambos diagramas de Gantt que ayudan a resumir y esclarecer toda la información explicada anteriormente.

Lista de tareas		
Nombre	Fecha de inicio	Recursos
		Fecha de fin
1.Introducción	18/02/15	24/02/15
1.1 Objetivo	18/02/15	19/02/15
1.2 Requisitos	19/02/15	21/02/15
1.3 Alcance y justificación de la utilidad del proyecto	23/02/15	24/02/15
2. Investigación bibliográfica y estado del arte sobre pavimentos de aeropuertos	25/02/15	28/02/15
2.1 Historia, evolución y estado actual	25/02/15	26/02/15
2.2 Descripción de los tipos de pavimentos	26/02/15	27/02/15
2.2.1 Descripción de las diferentes capas del pavimento flexible de los aeropuertos	27/02/15	28/02/15
2.2.2 Descripción de las diferentes capas del pavimento rígido de los aeropuertos	27/02/15	1/03/15
3. Planteamiento de los problemas en pavimentos flexibles y posibles soluciones al mismo	2/03/15	10/03/15
3.1 Formación de grietas	2/03/15	4/03/15
3.2 Desintegración	4/03/15	6/03/15
3.3 Distorsión	6/03/15	8/03/15
3.4 Pérdida de adherencia	9/03/15	10/03/15
3.5 Drenaje	9/03/15	10/03/15
4. Selección de los materiales y combinaciones de cara a su uso en pavimentos flexibles de aeropuertos	10/03/15	17/03/15
4.1 Materiales geo-sintéticos	10/03/15	14/03/15
4.2 Selección final del material	16/03/15	17/03/15
5. Caracterización del material seleccionado	17/03/15	28/04/15
5.1 Proceso de obtención de los films	17/03/15	20/03/15
5.2 Caracterización del comportamiento mecánico	20/03/15	11/04/15
5.2.1 Preparación de las probetas	20/03/15	28/03/15
5.2.2 Procedimiento de los ensayos	31/03/15	10/04/15
5.2.3 Presentación de resultados	10/04/15	11/04/15
5.3 Caracterización de la impermeabilidad al paso del agua	13/04/15	18/04/15
5.4 Caracterización de las propiedades térmicas	20/04/15	28/04/15
5.4.1 Procedimiento del ensayo	20/04/15	25/04/15
5.4.2 Presentación de resultados	27/04/15	28/04/15
6. Resumen económico	28/04/15	1/05/15
7. Estudio del impacto medioambiental	1/05/15	2/05/15
8. Consideraciones de seguridad	4/05/15	7/05/15
9. Planificación del proyecto	7/05/15	15/05/15
9.1 Planificación de las tareas	7/05/15	8/05/15
9.2 Dedicación a las tareas	8/05/15	9/05/15
9.3 Planificación de futuras tareas	11/05/15	15/05/15
10. Conclusiones y recomendaciones	15/05/15	22/05/15
11. Bibliografía y normativa	25/05/15	28/05/15
Elaboración del pliego de condiciones	25/05/15	26/05/15
Elaboración del presupuesto	26/05/15	27/05/15
Elaboración y revisión de la memoria	27/02/15	10/06/15
Elaboración de la presentación y preparación de la defensa oral	12/06/15	22/06/15

Figura 47. Listado de tareas extraído del software Gantt Project conforme a la planificación definitiva del proyecto

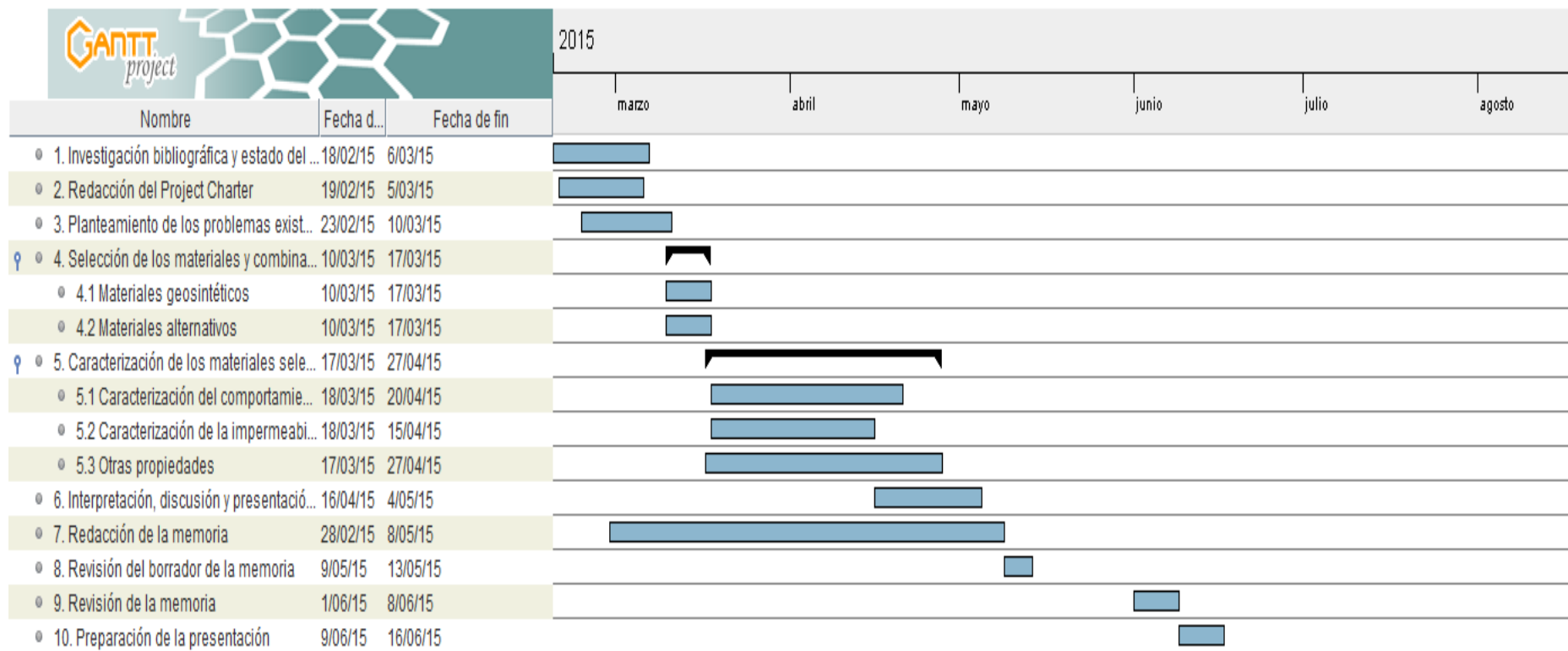


Figura 48. Diagrama de Gantt inicial, incluido en el Project Charter

En la siguiente hoja se adjunta el diagrama de Gantt definitivo del proyecto, cabe comentar que al haber un número de tareas muy elevado solo se describen las del nivel más inferior ya que aquellas que se encuentran en los niveles superiores solo engloban las mostradas a continuación. De todas formas, de cara a poder identificarlas de manera más sencilla se puede hacer uso de la figura 47 donde se describen las tareas en su totalidad.

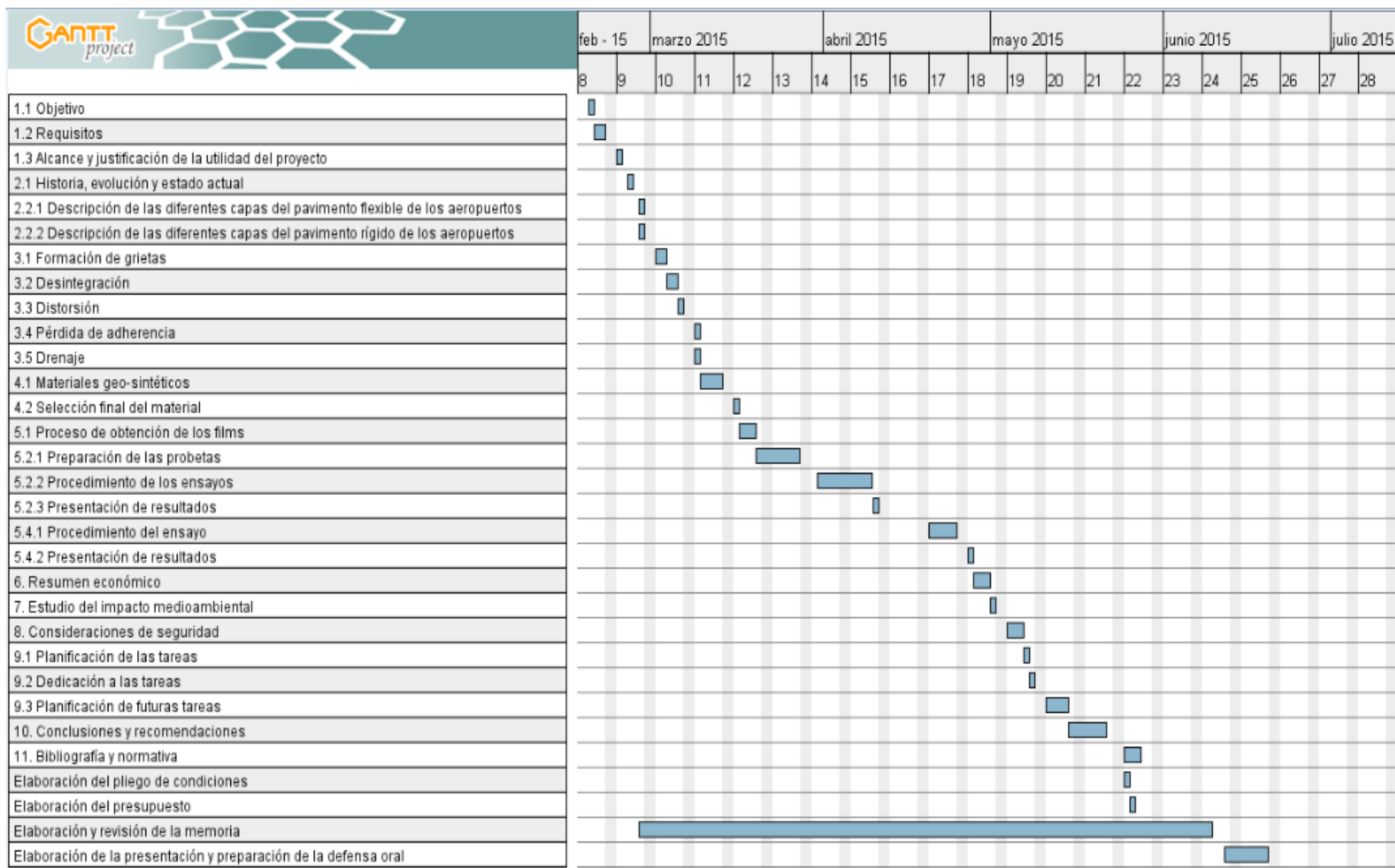


Figura 49. Diagrama de Gantt definitivo del proyecto

9.2 Dedicación a las tareas

En esta subsección se estudia el tiempo dedicado a cada una de las tareas que se han realizado durante el proyecto de cara a calcular el número de horas totales dedicadas, que aparece resumido en la siguiente tabla:

Tabla 23. Resumen del tiempo dedicado a las tareas

Tarea	Dedicación [h]
1. Introducción	23
2. Investigación bibliográfica y estado del arte sobre pavimentos de aeropuertos	76
3. Planteamiento de los problemas en pavimentos flexibles y posibles soluciones al mismo	48
4. Selección de los materiales y combinaciones de cara a su uso en pavimentos flexibles de aeropuertos	53
5. Caracterización del material seleccionado	89
6. Resumen económico	2
7. Estudio del impacto medioambiental	4
8. Consideraciones de seguridad	2
9. Planificación del proyecto	26
10. Conclusiones y recomendaciones	13
11. Bibliografía y normativa	5
Elaboración y redacción del Project Charter	45
Elaboración del Presupuesto	19
Elaboración del pliego de condiciones	12
Elaboración y revisión de la memoria	138
Elaboración de la presentación y preparación de la defensa oral	27
Total de horas	582

9.3 Planificación de futuras tareas

Teniendo en cuenta que este proyecto está inacabado, debido a que un cuatrimestre no es tiempo suficiente para llegar a poder llegar hasta la implantación de las mejoras estudiadas, es necesario llevar a cabo un estudio de las tareas que faltarían para poder finalizarlo. Con este objetivo es importante cuantificar el tiempo que llevarán cada una de las tareas para tener claro en un futuro, en el que el trabajo se reemprendiera, cuantas horas serían necesarias para llegar a terminarlo por completo.

Las tareas que se deberían realizar serían las siguientes en el orden indicado a continuación:

1. Estudio de un material separador de capa

El material que se ha estudiado tiene problema frente al rasgado por lo que sería interesante utilizar alguna capa de otro material que se debería estudiar en detalle de cara a que impidiera ese rasgado entre la capa inferior y la capa del material estudiado.

2. Estudio de elementos finitos

Para continuar con el desarrollo del proyecto sería útil un análisis de elementos finitos donde se corroborará si realmente el material escogido como separador de capa funciona correctamente, para ello se deberían montar las diferentes capas que caracterizan un pavimento flexible de aeropuerto de cara a ver cómo funciona toda la capa de material en conjunto y si existe algún tipo de error corregirlo para que el funcionamiento sea el correcto.

3. Construcción de un prototipo

Una vez se ha demostrado a partir de elementos finitos que el material funciona correctamente se debería construir un prototipo fiel a la simulación en elementos finitos

4. Certificación

En este caso mediante el prototipo se llevaría a cabo la certificación en cuestión de la capa de material utilizada. Para ello debería superar las condiciones más extremas que se le exige al pavimento de cara a su futura comercialización.

5. Comercialización y venta del producto

Finalmente, un poco más allá del ámbito ingenieril pero no por ello menos importante, se realizaría una campaña de promoción de futuro estudiando las condiciones del lugar donde se busca instalar el producto y en el caso de que sean favorables se realizaría la instalación el mismo.

Para terminar con la parte de planificación del trabajo futuro se muestra una tabla resumen con la dedicación de cada una de estas tareas de cara a poder tener en mente el desarrollo del proyecto desde su inicio a su final. En este caso no es necesario realizar un diagrama de Gantt ya que las tareas se realizarían en el orden marcado y siempre una detrás de la otra, sin poder realizar algunas en paralelo.

Tabla 24. Resumen del tiempo dedicado a las tareas futuras

Tarea futura	Dedicación [h]
1. Estudio de un material separador de capa	50
2. Estudio de elementos finitos	200
3. Construcción de un prototipo	50
4. Certificación	30
5. Comercialización y venta del producto	100
Total de horas	430

10. Conclusiones y recomendaciones

Durante el desarrollo del proyecto se han caracterizado las geo-membranas de polipropileno seleccionadas como material novedoso de cara a su implantación en pavimentos flexibles de aeropuertos.

En primer lugar cabe destacar que en cuanto a la información mostrada en la bibliografía la función básica para las que se utilizaban era como barrera de fluido y los materiales usados eran PE y PVC. En nuestro caso las geo-membranas de polipropileno han demostrado tener un buen comportamiento en cuanto al trabajo a tracción con lo que ayudan a reducir el espesor de la capa de material del pavimento, lo cual resulta de mucha utilidad. Al estar fuertemente orientadas en una dirección, las probetas en la dirección MD resultaron trabajar mejor alcanzando valores de resistencia máxima y de deformación máxima mucho mayores que aquellas orientadas en la dirección transversal TD.

En segundo lugar es cierto que la caracterización del comportamiento frente al rasgado ha mostrado que el material no trabaja bien en este aspecto por lo que sería necesario incluir un material separador de capa. Como ya se estudió en la sección 4 podría ser un geo-textil, ya utilizado en casos reales en la capa de subrasante o incluso se podría llevar a cabo en la subbase ya que las geo-membranas serían idóneas trabajando como barrera contra el fluido en esta capa. Es por ello que la tarea de seleccionar el material separador de capa es el primer punto clave en las tareas de futuro de cara a la futura comercialización del producto. Aun así en algunos casos concretos posiblemente si la interacción no fuera muy grande podría evitarse incluir este separador de capa, estudio que se debería realizar sobre cada caso en concreto.

En tercer lugar en la caracterización frente a la impermeabilidad al paso del agua, característica más importante debido a la función de barrera contra el fluido que desempeña, el resultado obtenido se encuentra dentro del rango mostrado en la sección 4 para geo-membranas que realizan una función similar por lo que se puede concluir que llevará a cabo esta función de forma correcta.

También cabe destacar que de las propiedades térmicas se ha obtenido que el material no presenta una degradación y pérdida de masa hasta alrededor de los 400°C, temperatura muy por encima de las de normal funcionamiento en los pavimentos flexibles de aeropuertos. A su vez su temperatura de fusión es de 167°C que se encontraría aun por encima de la de trabajo normal ya que otros materiales como el PE con temperaturas de fusión similares están siendo utilizados en la actualidad, por lo que no habría problema en su implantación.

Por otro lado, en cuanto a las recomendaciones es importante resaltar que en la planificación futura, el análisis de elementos finitos será de gran utilidad de cara a simular las geo-membranas junto con el separador de capa y otros materiales típicos de la capa de subrasante y subbase. De esta manera se tendrá una visión de conjunto que resultará de gran utilidad para la posterior elaboración del prototipo y certificación.

Para acabar con esta sección, en cuanto a las lecciones aprendidas, cabe remarcar que aun siendo muy ambicioso el objetivo de diseñar una capa de material geo-sintético para su aplicación en pavimentos de aeropuertos, se ha llevado a cabo el trabajo propuesto y faltaría un poco de tiempo para finalizar las tareas que se detallan en el plan de futuro y obtener un producto definitivo.

Es por ello que he podido extraer muchos conocimientos desconocidos hasta el momento por mí, la gran mayoría asociados a la parte experimental y al uso de equipamiento específico junto con un conocimiento teórico de las propiedades básicas para caracterizar un material de este tipo, principalmente el ensayo de impermeabilidad al agua y el análisis termogravimétrico. A su vez, y no menos importante un conocimiento del estado actual y revisión del estado del arte de los pavimentos de aeropuertos, tanto de su estructura y composición, de sus principales problemas y de casos reales de aplicación. Todo ello ha permitido conocer nuevos materiales o materiales ya conocidos pero utilizados en aplicaciones novedosas de gran interés.

11. Bibliografía y normativa

Bibliografía

- [1]. Armstrong, L., 1995. Project profile. , p.1.
- [2]. Buonsanti, M. & Leonardi, G., 2012. FEM analysis of airport flexible pavements reinforced with geogrids. *Advanced Science Letters*, 13(1), pp.392–395.
- [3]. Bystrom, J., Overmann, L.K. & Ericsson, L.O., 1996. Geosynthetic containment beneath Stockholm-Arlanda Airport. *Geotextiles and Geomembranes*, 14(3-4), pp.201–205.
- [4]. Calvo, H.N., 2011. Evolución histórica de los aeropuertos aplicación del pmbok para el project management de nuevas infraestructuras aeroportuarias.
- [5]. Cancelli, P., 2000. INCHON INTERNATIONAL AIRPORT: SUBGRADE REINFORCEMENT WITH GEOGRIDS. , (May 1997).
- [6]. Correia, N.S. & Zornberg, J.G., 2014. Influence of tack coat rate on the properties of paving geosynthetics. *Transportation Geotechnics*, 1(1), pp.45–54. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S221439121400004X> [Accessed March 4, 2015].
- [7]. J.M. Barling, 1997. El hormigón y los pavimentos de aeropuertos. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 123(4).
- [8]. Koerner, R.M., 2005. *Designing with geosynthetics* Quinta edi., United States: Pearson Prentice Hall.
- [9]. Moghaddam, T.B., Karim, M.R. & Abdelaziz, M., 2011. A review on fatigue and rutting performance of asphalt mixes. *Scientific Research and Essays*, 6(4), pp.670–682. Available at: <http://www.academicjournals.org/journal/SRE/article-abstract/D84906922639>.
- [10]. Multi-line and Geosynthetix, 2005. PP Biaxial Geogrid Fiberglass Geogrid. , p.2. Available at: www.multi-line.com.ph/brochure/msc_geosynthetix.pdf [Accessed February 26, 2015].
- [11]. NAUE, 2011. Berlin-Brandenburg International Airport Airport & Runway Designs : Geosynthetics Improve Safety.
- [12]. NAUE, 2006. *Geosynthetics in Airport Construction on Vimeo*, United States. Available at: <https://vimeo.com/32846866> [Accessed March 4, 2015].
- [13]. Palmeira, E.M. et al., 2008. Advances in Geosynthetics Materials and Applications for Soil Reinforcement and Environmental Protection Works. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*.
- [14]. Stark, T.D., Bartlett, S.F. & Arellano, D., 2001. Expanded Polystyrene (EPS) Geofoam Applications & Technical Data. , p.14.

Normativa

- [1]. UNE-EN ISO 527-1:1993 y Corrigendum 1:1994. Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 1: Principios generales.
- [2]. UNE-EN ISO 527-3:1995. Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 3: Condiciones de ensayo para películas y hojas.
- [3]. UNE-EN ISO 6383-1:1983. Plásticos. Películas y láminas de plástico. Determinación de la resistencia al rasgado. Parte 1: Método de la probeta pantalón.
- [4]. UNE-EN ISO 1133:1997. Determinación del índice de fluidez de materiales termoplásticos en masa y en volumen.
- [5]. UNE-EN ISO 1183:2004. Plásticos. Métodos para determinar la densidad de plásticos no celulares.